

BRUNO PEREIRA TONIOLO

**SIMULAÇÃO ESPACIAL DO POTENCIAL DE UNIVERSALIZAÇÃO
DO ESGOTAMENTO SANITÁRIO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO
RIO COTIA**

Sorocaba
2025



BRUNO PEREIRA TONIOLO

**SIMULAÇÃO ESPACIAL DO POTENCIAL DE UNIVERSALIZAÇÃO
DO ESGOTAMENTO SANITÁRIO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO
RIO COTIA**

Tese apresentada como requisito para a obtenção do título de Doutor em Ciências Ambientais da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" na Área de Concentração, Diagnóstico, Tratamento e Recuperação Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Roberto Wagner Lourenço

Sorocaba
2025



T665s

Toniolo, Bruno Pereira

Simulação espacial do potencial de universalização do esgotamento Sanitário na Bacia Hidrográfica do Rio Cotia / Bruno Pereira Toniolo.

-- Sorocaba, 2025

182 p. : il., tabs., fotos, mapas

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP),
Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba

Orientador: Roberto Wagner Lourenço

1. Previsão. 2. Geoprocessamento. 3. Esgotos. 4. Modelagem de dados. 5. Métodos de simulação. I. Título.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

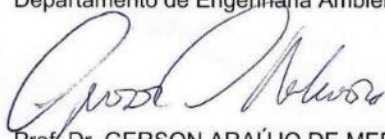
TÍTULO DA TESE: Simulação espacial do potencial de universalização do esgotamento sanitário na bacia hidrográfica do Rio Cotia

AUTOR: BRUNO PEREIRA TONIOLO
ORIENTADOR: ROBERTO WAGNER LOURENÇO

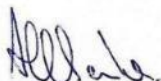
Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em Ciências Ambientais, área: Diagnóstico, Tratamento e Recuperação Ambiental pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. ROBERTO WAGNER LOURENÇO (Participação Presencial)
Departamento de Engenharia Ambiental / UNESP / Câmpus de Sorocaba - ICTS



Prof. Dr. GERSON ARAÚJO DE MEDEIROS (Participação Presencial)
Departamento de Engenharia Ambiental / UNESP / Câmpus de Sorocaba - ICTS



Prof. Dr. ANDRÉ CORDEIRO ALVES DOS SANTOS (Participação Presencial)
Departamento de Biologia / Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) - Câmpus de Sorocaba



Prof. Dr. LEANDRO CARDOSO DE MORAIS (Participação Presencial)
Departamento de Engenharia Ambiental / UNESP / Câmpus de Sorocaba - ICTS



Profª. Drª. KELLY CRISTINA TONELLO (Participação Presencial)
Departamento de Engenharia Florestal / Universidade Federal de São Carlos - UFSCAR

Sorocaba, 04 de dezembro de 2025.

AGRADECIMENTOS

Sou grato primeiramente aos meus pais que deram todo conforto e educação necessários para eu viver – Dona Dalva e Seu Zé. Também agradeço à minha tia pelo incentivo contínuo ao aprimoramento de minha formação e pelo apoio na revisão literária dessa tese. Agradeço, *in memoriam*, a minha vizinha Dona Joana, que sempre quis que eu não “lombeasse caixa” – até hoje não sei ao certo esta expressão, mas que sempre me incentivou a estudar.

Agradeço a todos servidores da Unesp Sorocaba, que sempre foram prestativos em me atender quando precisei. Também deixo minhas saudações aos orientadores Darllan e China, que muito agregaram ao meu aprendizado, de forma que suas opiniões, dicas e *insights* foram primordiais para o desfecho de minha pesquisa.

Sou agradecido ao Leonardo Vendruscolo que me ajudou a fazer os mapas e análises espaciais. Agradeço ao meu xará, Bruno Bocato, por ter me apoiado inúmeras vezes com recursos materiais e informações técnicas da empresa. Saúdo também ao Bruno Ricardo que me ajudou a fazer os desenhos e diagramas.

Sou imensamente grato à Carla De Chiara por compartilhar sua experiência profissional comigo, enriquecendo minha pesquisa com suas orientações em SIG e histórias da Sabesp. Além disso, sua revisão impecável foi essencial para a conclusão da minha tese. Seu conhecimento e apoio foram inestimáveis.

Também deixo meus cumprimentos ao “zé do esgoto” Carlinhos que fez as vistorias de campo para mim. Você me ensinou com sua humildade, cheguei a ser seu chefe e o que sobra é a nossa amizade, meu camarada. Beijos para sua linda filha, Maria Helena.

Agradeço ao Alessandro Paixão por ter confiado em meu trabalho e ter me promovido como supervisor de cadastro na época, isso foi um marco em minha carreira.

Deixo meus cumprimentos também a todos colaboradores da Sabesp que de alguma forma contribuíram com meu estudo, especialmente o pessoal do EPP e OOO.

Não posso deixar de ser grato aos meus amigos que sempre me apoiaram em tempos marcantes: André, mais sábio do que marceneiro, Rogério Samurai, japonês parceiro da FATEC (sou eternamente grato por ajudar na recuperação do meu pai) e Lucindo que me mostrou o que é ter bom gosto pra hard rock.

Finalmente, deixo minhas felicitações a todas as pessoas que de alguma forma me ajudaram a ser uma pessoa melhor e sobretudo a Deus.

O presente trabalho não recebeu financiamento de agência financiadora.

TONIOLO, B. P. **Simulação espacial do potencial de universalização do esgotamento sanitário na Bacia Hidrográfica do Rio Cotia**. 2025. 182 f. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais) – Instituto de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Sorocaba, 2025.

RESUMO

A universalização do sistema de esgotamento sanitário (SES) é um desafio para o desenvolvimento socioambiental no Brasil, especialmente em áreas periféricas e rurais. O novo Marco Legal do Saneamento e o processo de desestatização da Sabesp anteciparam as metas para o Estado de São Paulo, de 2033 para 2029, com índices superiores a 90%. Neste contexto, esta tese avaliou o potencial de universalização na Bacia Hidrográfica do Rio Cotia (BHRC) por meio da simulação espacial das coberturas de coleta e tratamento de esgoto. Foi elaborado um banco de dados geoespacial integrando variáveis físicas, operacionais e socioeconômicas, considerando a situação de 2024 e projeções de cobertura para 2029, 2033, 2040 e anos posteriores. A modelagem utilizou modelos matemáticos – como redes neurais *Multi-Layer Perceptron* (MLP) e regressão logística – e cadeias de Markov, com validação estatística dos resultados. Também foi elaborada a caracterização do SES. As simulações indicaram cobertura universalizada do SES na BHRC, incluindo ligações existentes, áreas em expansão e novos empreendimentos. A caracterização do sistema mostrou que todo o esgoto da bacia é destinado à ETE Barueri; há 180 pontos de lançamento de ; a rede totaliza 738,9 km, com 87.954 ligações ativas e vazão média de 506 L/s; entre 2021 e 2024 ocorreram 584 desobstruções. Estima-se a necessidade de 710 km adicionais de rede para universalizar a coleta. Entre 2002 e 2024, a área urbana praticamente dobrou e a pastagem reduziu-se em cerca de 50%. A cobertura de coleta cresceu significativamente entre 2008 e 2024, enquanto o tratamento avançou de forma mais lenta. As variáveis mais influentes foram proximidade das redes coletoras e de água, densidade demográfica e consumo de água. A rede neural MLP teve melhor desempenho em longo prazo, e a regressão logística, em curto prazo. Para 2029, as coberturas previstas foram de 91,64% para coleta (ICC) e 81,33% para tratamento (ICT), superando as metas de 87% e 53%, respectivamente. O Índice de Redução de Lançamentos (IRL) apontou eliminação de 90% do esgoto não tratado até 2040, e o Índice de Atendimento Populacional (IAP) apresentou mais de 90% da população conectada à rede em 2029. As projeções até 2080 demonstraram a viabilidade da universalização, associada à expansão urbana e à alta precisão dos modelos. As discussões demonstram que a expansão do SES na BHRC reflete o padrão histórico de priorização das áreas urbanas consolidadas, sendo condicionada pelo crescimento urbano e por fatores externos ao controle da concessionária — como políticas públicas, financiamento e uso do solo —, além de limitações da modelagem que não contempla sistemas isolados, o que reforça a necessidade de integrar dimensões operacionais, urbanas e institucionais nas estratégias de universalização. Conclui-se que o modelo apresentou robustez nas simulações até o ano de 2080, a partir do qual ocorrem erros mais expressivos, destacando-se o bom desempenho do MLP em projeções de longo prazo. Verificou-se que a modelagem espacial permite antecipar o alcance das metas de universalização nas áreas urbanas e em favelas, enquanto nas áreas rurais esse avanço é limitado, configurando um desafio decorrente da maior distância e dispersão em relação ao SES existente. Recomenda-se a replicação da metodologia em outros locais com características sanitárias semelhantes.

Palavras chaves: Predição. Geotecnologias. Saneamento Básico. Modelo Matemático. Cobertura de Coleta e Tratamento de Esgoto.

TONIOLO, B. P. **Spatial simulation of the potential for universalization of sanitary sewage in the Cotia River Basin.** 2025. 182 p. Doctoral dissertation (Doctorate in Environmental Sciences) – Institute of Science and Technology, São Paulo State University, Sorocaba, 2025.

ABSTRACT

The universalization of the wastewater system (WWS) is a strategic challenge for social and environmental development in Brazil, especially in peripheral and rural areas. The new Brazilian Sanitation Legal Framework and the privatization process of the São Paulo State Basic Sanitation Company (Sabesp) brought forward the state targets from 2033 to 2029, with coverage rates above 90%. In this context, this thesis evaluated the potential for universalization in the Cotia River Basin (BHRC) through spatial simulation of wastewater collection and treatment coverage. A geospatial database was developed, integrating physical, operational, and socioeconomic variables, considering the 2024 situation and projections for 2029, 2033, 2040, and subsequent years. The modeling employed mathematical models—such as neural networks, logistic regression, and Markov chains—with statistical validation of the results. A comprehensive characterization of WWS was also conducted. The simulations indicated universalized coverage in the BHRC, including existing connections, expansion areas, and new developments. The system characterization showed that all sewage from the basin is directed to the Barueri Wastewater Treatment Plant (WWTP); 180 untreated discharge points were identified; the network totals 738.9 km, with 87,954 active connections and an average effluent flow of 506 L/s; and 584 obstructions were recorded between 2021 and 2024. Approximately 710 km of additional network are required to achieve full collection coverage. Between 2002 and 2024, the urban area nearly doubled, while pasture decreased by about 50%. Collection coverage increased significantly from 2008 to 2024, whereas treatment expanded more slowly. The most influential variables were proximity to sewer and water networks, population density, and water consumption. The Multi-Layer Perceptron (MLP) neural network performed best in long-term projections, while logistic regression showed good performance in short-term forecasts. For 2029, the projected coverage reached 91.64% for collection (ICC) and 81.33% for treatment (ICT), surpassing the established targets of 87% and 53%, respectively. The Discharge Reduction Index (IRL) indicated a 90% reduction in untreated discharges by 2040, and the Population Service Index (IAP) showed that more than 90% of the BHRC population will be connected to the collection network by 2029. Projections up to 2080 demonstrated the feasibility of universalization, associated with urban expansion and high model accuracy. The discussions show that the expansion of the WWS in the BHRC reflects the historical pattern of prioritizing consolidated urban areas, being conditioned by urban growth and external factors beyond the concessionaire's control—such as public policies, financing, and land use—along with modeling limitations that exclude isolated systems, highlighting the need to integrate operational, urban, and institutional dimensions in universalization strategies. The conclusions indicate that the model was robust up to the year 2080, beyond which more significant errors occur, with the MLP showing superior performance in long-term simulations. It was verified that spatial modeling allows anticipating universalization targets in urban and informal areas, whereas in rural regions progress is limited due to greater distance and dispersion from existing systems. Replication of the methodology is recommended in other places with similar sanitary characteristics.

Keywords: Prediction. Geotechnologies. Basic Sanitation. Mathematical Model. Sewer Collection and Treatment Coverage.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Cobertura de tratamento de esgoto da Região Metropolitana de São Paulo.....	23
Figura 2. Mapa de localização da Bacia Hidrográfica do Rio Cotia.....	32
Figura 3. Fluxograma da metodologia.....	33
Figura 4. Mapa da cobertura de esgotamento universalizada.....	48
Figura 5. Mapa do Sistema de Esgotamento Sanitário existente.....	50
Figura 6. Gráfico de extensão de rede assentada por ano (em km).....	52
Figura 7. Mapa de tipos de ligações existentes.	53
Figura 8. Mapas de categoria da ligação (a) e atividade econômica (b).	54
Figura 9. Mapa de lançamentos de esgoto.....	56
Figura 10. Registro fotográfico de visita em campo para verificação de lançamentos.....	57
Figura 11. Balanço de massas das vazões de esgoto (L/s).	60
Figura 12. Mapa de ocorrência de desobstrução de rede, entre 2021 e 2024.....	62
Figura 13. Mapa das redes de esgoto a implantar.	64
Figura 14. Mapas de uso do solo de 2002 (a) e 2024 (b).	66
Figura 15. Mapa de mudança da cobertura de coleta de esgoto de 2008, 2016 e 2024.	69
Figura 16. Mapa de mudança da cobertura de tratamento de esgoto de 2008, 2016 e 2024.	70
Figura 17. Gráfico de expansão da cobertura de tratamento de esgoto.....	71
Figura 18. Mapa da variável consumo de água.	73
Figura 19. Mapa da variável declividade do terreno.	74
Figura 20. Mapa da variável densidade demográfica.	75
Figura 21. Mapa da variável proximidade de ocorrência de manutenção em rede.	76
Figura 22. Mapa da variável proximidade das unidades não atendidas.	77
Figura 23. Mapa da variável proximidade das áreas de expansão.	78
Figura 24. Mapa da variável proximidade de Estação de Tratamento de Esgoto.	79
Figura 25. Mapa da variável proximidade de Estação Elevatória de Esgoto.	80
Figura 26. Mapa da variável proximidade de rede coletora de esgoto.....	81
Figura 27. Mapa da variável proximidade de rede de distribuição de água.	82
Figura 28. Mapa da variável proximidade de empreendimentos não atendidos.	83
Figura 29. Mapa da variável proximidade de vias e núcleos urbanos.....	84
Figura 30. Mapa da variável proximidade de hidrografia.	85
Figura 31. Mapa da variável transição de uso do solo de 2002 para 2024.....	86

Figura 32. Mapa da variável custo de universalização do Sistema de Esgotamento Sanitário.	87
Figura 33. Mapa da variável vazão de esgoto não tratado.	88
Figura 34. Mapa da variável proximidade de lançamento de efluente.	89
Figura 35. Gráfico de indicadores de desempenho dos modelos matemáticos de cobertura de coleta para simulação de curto prazo, 2024.	90
Figura 36. Gráfico de indicadores de desempenho dos modelos matemáticos de cobertura de tratamento para simulação de curto prazo, 2024.	91
Figura 37. Mapa da cobertura de coleta simulada de 2024 para os modelos matemáticos.	93
Figura 38. Mapa da cobertura de tratamento simulada de 2024 para os modelos matemáticos.	95
Figura 39. Gráfico de indicadores de desempenho dos modelos matemáticos de cobertura de coleta para simulação de longo prazo, 2060.	99
Figura 40. Gráfico de indicadores de desempenho dos modelos matemáticos de cobertura de tratamento para simulação de longo prazo, 2060.	100
Figura 41. Mapa da cobertura de coleta simulada do ano de 2060 para os seis modelos matemáticos.	102
Figura 42. Mapa da cobertura de tratamento simulada do ano de 2060 para os seis modelos matemáticos.	104
Figura 43. Mapa comparativo da cobertura existente de 2024 (a) entre a cobertura simulada pelo modelo da Regressão Logística (b).	108
Figura 44. Mapa da evolução da cobertura de coleta simulada para os anos de 2029, 2033 e 2040, pelo algoritmo <i>Multi-Layer Perceptron</i>	110
Figura 45. Mapa da evolução da cobertura de tratamento simulada para os anos de 2029, 2033 e 2040, pelo algoritmo <i>Multi-Layer Perceptron</i>	112
Figura 46. Mapa da evolução da cobertura de coleta simulada para os anos de 2024, 2025, 2026, 2027, 2028, 2029, 2033, 2040, 2050, 2060, 2070 e 2080.	114
Figura 47. Mapa da evolução da cobertura de tratamento simulada para os anos de 2024, 2025, 2026, 2027, 2028, 2029, 2033, 2040, 2050, 2060, 2070 e 2080.	115
Figura 48. Mapa da validação da cobertura de coleta simulada para os anos de 2024, 2025, 2026, 2027, 2028, 2029, 2033, 2040, 2050, 2060, 2070 e 2080.	117
Figura 49. Mapa da validação da cobertura de tratamento simulada para os anos de 2024, 2025, 2026, 2027, 2028, 2029, 2033, 2040, 2050, 2060, 2070 e 2080.	119
Figura 50. Representatividade dos acertos, erros e falsos alarmes da validação.	121

Figura 51. Comportamento das coberturas simuladas ao longo dos anos preditos.....	122
Figura 52. Mapa de previsão de cobertura de esgotamento das unidades não atendidas para coleta (a) e tratamento (b).....	124
Figura 53. Mapa de previsão de cobertura de esgotamento dos empreendimentos imobiliários para coleta (a) e tratamento (b).	128
Figura 54. Mapa de previsão de eliminação dos lançamentos de efluente.....	130
Figura 55. Mapa de previsão das redes a implantar para coleta (a) e tratamento (b).	132
Figura 56. Mapa de previsão de tratamento do esgoto em função das redes coletoras existentes.	135
Figura 57. Cronograma de desembolso de obras necessárias para atingir a universalização.	138
Figura 58. Gráfico da evolução do Índice de Redução de Lançamento de Esgoto Não Tratado – IRL (%).	141
Figura 59. Gráfico da evolução do Índice de Cobertura de Coleta – ICC (%).	142
Figura 60. Gráfico da evolução do Índice de Cobertura de Tratamento – ICT (%).	143
Figura 61. Gráfico da evolução do Índice de Potencial de Virada – IPV (%).	144
Figura 62. Gráfico da evolução do Índice de Atendimento Populacional – IAP (%).	145
Figura 63. Gráfico da evolução do Índice de Cobertura Hidrográfica – ICH (%).	146
Figura 64. Gráfico da evolução da Taxa de Expansão de Cobertura – TEC (%).	147
Figura 65. Gráfico da evolução do Índice de Vazão de Esgoto Não Tratado – IVNT (%).	148
Figura 66. Gráfico da comparação do Índice de Cobertura de Coleta de Esgoto (ICC %) versus o Indicador de Cobertura de Serviço de Coleta (ICE %).	149
Figura 67. Gráfico da comparação do Índice de Cobertura de Tratamento de Esgoto (ICT %) versus o Indicador de Cobertura de Serviço de Tratamento de Esgoto (IEC %).	150
Figura 68. Mapa do Índice de Cobertura de Coleta de Esgoto (ICC %) 2033 regionalizado por setor censitário.	152
Figura 69. Mapa do Índice de Cobertura de Tratamento de Esgoto (ICT %) 2033 regionalizado por setor censitário.	152
Figura 70. Ranking das variáveis explanatórias conforme resposta do questionário.	179

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Dados e materiais usados na pesquisa.	34
Tabela 2. Parâmetros abordados sobre a caracterização do Sistema de Esgotamento Sanitário.....	37
Tabela 3. Relação de variáveis explanatórias.	40
Tabela 4. Descrição dos modelos matemáticos de potencial de transição.	41
Tabela 5. Indicadores de desempenho de calibração.....	42
Tabela 6. Interpretação de p-valor dos indicadores Kappa e McNemar.	42
Tabela 7. Indicadores espaciais das áreas simuladas.....	45
Tabela 8. Metas de universalização.	46
Tabela 9. Acréscimo de extensão de rede coletora prevista (metros), por ano.	47
Tabela 10. Dados operacionais das áreas de contribuição dos lançamentos de esgoto.....	58
Tabela 11. Dados de vazão de esgoto do Baixo Cotia.....	59
Tabela 12. Área e variação das classes de uso do solo de 2002 e 2024.	67
Tabela 13. Contagem de ligações nas coberturas.	72
Tabela 14. Valores de p-valor dos testes Kappa e McNemar, segundo modelos matemáticos testados para cenário de curto prazo, 2024.....	92
Tabela 15. Parâmetros do modelo Regressão Logística da simulação de curto prazo, 2024.	97
Tabela 16. Valores de p-valor dos testes Kappa e McNemar, segundo modelos matemáticos testados para cenário de longo prazo, 2060.....	100
Tabela 17. Parâmetros do modelo <i>Multi-Layer Perceptron</i> para simulação de longo prazo, 2060.	106
Tabela 18. Valor das áreas simuladas em hectare.	113
Tabela 19. Quantidade de unidades não atendidas classificadas por ano previsto de cobertura de esgotamento sanitário.	125
Tabela 20. Quantidade de empreendimentos imobiliários não atendidos classificados por ano previsto de cobertura de esgotamento sanitário.....	126
Tabela 21. Extensão em km das redes a implantar separada por ano.....	133
Tabela 22. Extensão em km das redes existentes em operação separada por ano e tipo..	136
Tabela 23. Indicadores de esgotamento sanitário.	140
Tabela 24. Valores médios dos índices de coleta e tratamento de esgoto por recorte territorial.....	154

Tabela 25. Comparação de extensão prevista de rede coletora com extensão determinada.	156
Tabela 26. Características dos especialistas.	171
Tabela 27. Detalhamento das experiências.	172
Tabela 28. Descrição das variáveis explanatórias.	173
Tabela 29. Indicadores de avaliação estatística do questionário.	176
Tabela 30. Resultados do questionário escala Likert.	177
Tabela 31. Resultados das métricas estatísticas.	180

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BHRC	–	Bacia Hidrográfica do Rio Cotia
CEM	–	Centro de Estudos Metropolitanos
EEE	–	Estação Elevatória de Esgoto
ETE	–	Estação de Tratamento de Esgoto
FabDEM	–	<i>Forest and Buildings Remove Copernicus DEM</i>
IAP	–	Índice de Atendimento Populacional
IBGE	–	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICC	–	Índice de Cobertura de Coleta de Esgoto
ICE	–	Indicador de Cobertura do Serviço de Coleta
ICH	–	Índice de Cobertura Hidrográfica
ICT	–	Índice de Cobertura de Tratamento de Esgoto
IEC	–	Indicador de Cobertura do Serviço de Tratamento de Esgoto
IPT	–	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
IPV	–	Índice de Potencial de Virada
IRL	–	Índice de Redução de Lançamentos de Esgoto Não Tratado
IVNT	–	Índice de Vazão de Esgoto Não Tratado
LCM	–	<i>Land Change Modeler</i>
MDT	–	Modelo Digital de Terreno
MLP	–	<i>Multi-Layer Perceptron</i>
ODS	–	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
PI	–	Plano de Informação
RL	–	Regressão Logística
SABESP	–	Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
SEMIL	–	Secretaria de Meio Ambiente, Infraestrutura e Logística do Estado de São Paulo
SES	–	Sistema de Esgotamento Sanitário
SIG	–	Sistema de Informação Geográfica
SimWeight	–	<i>Similarity-Weighted Instance-base Machine Learning</i>
SVM	–	<i>Support Vector Machine</i>
TEC _c	–	Taxa de Expansão da Cobertura de Coleta de Esgoto
TEC _t	–	Taxa de Expansão da Cobertura de Tratamento de Esgoto
UOS	–	Uso e Ocupação do Solo
WNL	–	<i>Weighted Normalized Likelihood</i>

SUMÁRIO

1	APRESENTAÇÃO	16
2	INTRODUÇÃO.....	18
3	HIPÓTESE.....	20
4	OBJETIVOS.....	21
4.1	OBJETIVO GERAL.....	21
4.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
5	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	22
5.1	SISTEMA DE ESGOTAMENTO SANITÁRIO	22
5.2	COBERTURA DE INFRAESTRUTURA.....	22
5.3	UNIVERSLIZAÇÃO DO SANEAMENTO BÁSICO	25
5.4	PARÂMETROS DO MARCO DO SANEAMENTO.....	26
5.5	INVESTIMENTOS PARA A UNIVERSALIZAÇÃO DO SANEAMENTO	27
5.6	GEOPROCESSAMENTO.....	28
5.7	MODELAGEM	28
5.8	ANÁLISE DE MUDANÇA DE USO E COBERTURA DO SOLO	29
5.9	SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS FUTUROS.....	30
6	MATERIAL E MÉTODOS	32
6.1	ÁREA DE ESTUDO.....	32
6.2	SEQUÊNCIA METODOLÓGICA.....	33
6.3	MONTAGEM DO BANCO DE DADOS GEOSPACIAIS	35
6.4	DELIMITAÇÃO DA COBERTURA DO SES UNIVERSALIZADO	36
6.5	CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA DE ESGOTAMENTO SANITÁRIO.....	37
6.6	SIMULAÇÃO E PREDIÇÃO	38
6.6.1	ESTUDO DE MUDANÇA DA COBERTURA DE ESGOTAMENTO SANITÁRIO	39
6.6.2	ESCOLHA DO SUBMODELO DE TRANSIÇÃO	39
6.6.3	ESCOLHA DAS VARIÁVEIS EXPLANATÓRIAS	39
6.6.4	ESCOLHA DO MODELO MATEMÁTICO DE POTENCIAL DE TRANSIÇÃO.....	41
6.6.5	ESTUDO DE RESTRIÇÕES E INCENTIVOS DE CRESCIMENTO.....	43
6.6.6	ESTUDO DE PREVISÃO DE MUDANÇA ESPAÇO-TEMPORAL DO SES	43
6.6.7	VALIDAÇÃO	44
6.7	DETERMINAÇÃO DE INDICADORES DE ESGOTAMENTO SANITÁRIO.....	45
6.8	COMPARAÇÃO DOS DADOS SIMULADOS COM OS DADOS PRÉ EXISTENTES	46
7	RESULTADOS E DISCUSSÕES	48
7.1	ANÁLISE DA COBERTURA UNIVERSALIZADA	48
7.2	CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA DE ESGOTAMENTO SANITÁRIO.....	49

7.3	EVOLUÇÃO DA COBERTURA.....	69
7.4	ANÁLISE DAS VARIÁVEIS EXPLANATÓRIAS	72
7.5	ANÁLISE DA ESCOLHA DOS MODELOS MATEMÁTICOS DE TRANSIÇÃO	90
7.6	ANÁLISE DA PREDIÇÃO DA COBERTURA E VALIDAÇÃO.....	108
7.7	ANÁLISE DOS INDICADORES DE ESGOTAMENTO.....	140
7.8	ANÁLISE COMPARATIVA DE DADO SIMULADO COM DADO PRÉ EXISTENTE.....	149
8	CONCLUSÃO.....	159
	REFERÊNCIAS	161
	APÊNDICES.....	171
	APÊNDICE A – ELABORAÇÃO DO QUESTIONÁRIO EM ESCALA LIKERT	171
	APÊNDICE B – RESULTADOS SOBRE O QUESTIONÁRIO	177
	APÊNDICE C – CONCLUSÕES	182

1 APRESENTAÇÃO

A tão necessária universalização dos serviços de esgotamento sanitário sempre despertou minha atenção – talvez por ser um objetivo que o país anuncia com frequência, mas que ainda parece distante da realidade.

Durante o meu mestrado, tornou-se impossível ignorar a crescente discussão sobre o tema, especialmente após o novo Marco Legal do Saneamento, que estabeleceu a meta ambiciosa de levar esgoto tratado a toda a população até 2033. Desde então, uma pergunta me acompanha: como medir, de forma objetiva, um avanço que muitas vezes parece mais presente nos discursos do que nas obras? E, além disso, como antecipar caminhos para uma universalização que, no ritmo atual, parece sempre adiada?

Com essa inquietação, decidi avançar no doutorado. A proposta foi clara: utilizar geoprocessamento e modelagem espacial para compreender a dinâmica territorial da expansão do serviço, simular cenários futuros, apoiar o planejamento e oferecer instrumentos que possam contribuir para decisões mais embasadas – ou, ao menos, apresentar algo mais concreto do que novas promessas em relatórios e apresentações.

O tema ganhou ainda mais relevância em 2024, quando a Sabesp foi desestatizada e a meta de universalização no Estado de São Paulo foi antecipada de 2033 para 2029. Com quase 30 milhões de pessoas dependentes da companhia, tornou-se evidente a urgência por ferramentas que auxiliem a definição de prioridades e a projeção de cenários de expansão.

Escolhi a Bacia do Rio Cotia porque já tinha um banco de dados geoespacial estruturado desde o meu mestrado. Além disso, tenho familiaridade com a região por atuar há mais de uma década na Sabesp, com diversas visitas de campo. É uma área que representa, ao mesmo tempo, um espaço de experimentação e um retrato dos desafios que ainda enfrentamos com o esgotamento sanitário.

Um diferencial desta pesquisa é a familiaridade que desenvolvi com a Sabesp ao longo dos anos como funcionário. Por ser uma empresa de grande porte, com estruturas e rotinas muito próprias, ela acaba funcionando quase como um ecossistema fechado, difícil de ser compreendido por quem está de fora. Meu envolvimento direto me permitiu acessar não apenas dados, mas também aspectos culturais e operacionais que nem sempre são visíveis externamente — em especial no que diz respeito às práticas ambientais. Tento, com isso,

trazer uma contribuição que una o olhar técnico com a vivência prática, sem perder de vista a complexidade e os limites desse contexto.

Espero que esta pesquisa vá além do campo acadêmico e contribua, de fato, para a universalização do saneamento. Sonhos e metas não faltam — o problema é que muitas vezes eles ficam no papel. O verdadeiro desafio está em transformar boas intenções em ações concretas que cheguem a quem ainda vive sem acesso ao básico. Se este trabalho conseguir apontar onde a urgência é maior e ajudar a direcionar esforços, mesmo que modestamente, já terá cumprido seu papel.



Vistoria de esgoto na Favela do Areião, Jaguaré, São Paulo. Um dia comum de campo, eu e o Carlinhos — desses que o tempo acabou guardando como boa lembrança. Novembro de 2022.

2 INTRODUÇÃO

Segundo Franco et al. (2024), o saneamento básico é essencial para a saúde pública e o desenvolvimento socioeconômico de um país. No Brasil, o acesso aos serviços sanitários, especialmente o esgotamento sanitário, ainda é um grande desafio. De acordo com o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2023), aproximadamente 83% da população brasileira urbana tem acesso à coleta de esgoto, mas apenas 50% do esgoto coletado é tratado, deixando uma considerável lacuna no atendimento às necessidades básicas da população. Essa disparidade não só compromete a qualidade de vida e a saúde pública, mas também acentua desigualdades socioambientais (VIEIRA et al., 2024a).

Segundo Medeiros et al. (2017) e Dib (2022), a ausência do tratamento do esgoto pode acarretar contaminação de rios, lagos e aquíferos, degradação da qualidade da água, eutrofização e morte de organismos aquáticos, poluição do solo, disseminação de agentes patogênicos, proliferação de vetores de doenças, emissão de gases nocivos e mau odor, além da redução da biodiversidade e comprometimento dos ecossistemas, afetando diretamente a saúde pública e a disponibilidade de recursos hídricos.

O Marco Legal do Saneamento (Lei Federal nº 14.026/2020) antecipou para 2033 as metas de universalização, prevendo 99% de acesso à água potável e 90% à coleta e tratamento de esgoto (BRASIL, 2020). Apesar do avanço, sua concretização exige investimentos robustos e reestruturação na gestão das infraestruturas, sobretudo na expansão dos sistemas de esgotamento sanitário, já que historicamente os recursos têm sido insuficientes, comprometendo a efetividade das políticas públicas (COSTA, 2023; CAPOBIANCO et al., 2024).

Dentro desse cenário, a Sabesp (Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo) adota o conceito de cobertura de coleta e tratamento como uma ferramenta de planejamento técnico, utilizada para monitorar o avanço do atendimento em esgotamento sanitário nos municípios sob sua operação. Esse conceito orienta a priorização de obras estruturantes voltadas à coleta e ao afastamento do efluente, buscando alinhar a expansão da infraestrutura aos prazos estabelecidos contratualmente. No entanto, embora seja um instrumento relevante para o planejamento, sua aplicação prática enfrenta desafios, especialmente quando confrontada com as complexidades territoriais, institucionais e operacionais que caracterizam o setor (SABESP, 2024a).

O conceito de cobertura apresenta um comportamento espacial muito semelhante ao processo de expansão urbana, de forma que as técnicas utilizadas para analisar mudanças no uso e cobertura do solo, comuns em estudos de geotecnologia, podem ser adaptadas para modelar a expansão da cobertura de esgoto. Métodos como autômatos celulares, cadeias de Markov e redes neurais, amplamente utilizados na modelagem de transições de uso e ocupação do solo, podem ser aplicados para prever o crescimento das redes de esgoto. Isso oferece uma abordagem inovadora para modelar e planejar a expansão da infraestrutura de esgotamento sanitário, facilitando o alcance das metas de universalização (FOLHARINI e OLIVEIRA, 2020; TONIOLO et al., 2024a).

Segundo Abrahão (2020), a aplicação de técnicas geoespaciais na gestão de expansão dos serviços de saneamento básico oferece uma solução eficiente e precisa, proporcionando suporte técnico para o planejamento das obras e a tomada de decisões estratégicas. Essas ferramentas possibilitam um acompanhamento contínuo e detalhado da expansão da cobertura de esgoto, contribuindo de forma decisiva para o cumprimento das metas estabelecidas pelo Marco Legal do Saneamento.

Para que o planejamento da expansão seja bem-sucedido, torna-se essencial a criação de um modelo de simulação robusto, capaz de prever o crescimento das coberturas de coleta e tratamento de esgoto. A escolha correta das variáveis relevantes é um fator crítico para a precisão do modelo. Variáveis como proximidade de redes coletoras existentes, densidade demográfica e consumo de água são fundamentais para capturar as dinâmicas que influenciam o crescimento do esgotamento sanitário. Um modelo bem estruturado, que considere esses fatores, pode auxiliar no gerenciamento estratégico, indicando as áreas prioritárias para a expansão e otimizando o uso dos recursos (ROCHA, 2023; SILVA e BACANI, 2023).

Neste contexto, o principal objetivo desta pesquisa é simular, a partir de um cenário, o crescimento da cobertura de coleta e tratamento de esgoto na Bacia Hidrográfica do Rio Cotia (BHRC), utilizando métodos matemáticos e geotecnológicos, com o propósito de avaliar o progresso rumo à universalização do esgotamento sanitário na área de estudo.

3 HIPÓTESE

A aplicação de modelos de simulação geoespacial e a seleção de variáveis relevantes contribuem para estimar, com maior embasamento, a tendência de crescimento de cobertura de coleta e tratamento de esgoto.

Essa abordagem auxilia na identificação de regiões prioritárias para a expansão da rede e na projeção de cenários para a universalização dos serviços, conforme estabelecido pelo Marco Legal do Saneamento.

No entanto, embora exista uma relação entre a expansão da cobertura e o crescimento urbano, é importante reconhecer que a dinâmica de ocupação do território nem sempre segue padrões previsíveis. Fatores como interesses políticos, pressões econômicas e decisões de planejamento urbano — muitas vezes alheias à lógica técnica — tornam a expansão urbana um fenômeno complexo e, em certa medida, imponderável.

Ainda assim, a hipótese desta pesquisa se sustenta na premissa de que as ferramentas de geotecnologia, amplamente utilizadas em estudos de uso e ocupação do solo, podem ser adaptadas para apoiar o planejamento estratégico do saneamento, desde que consideradas suas limitações e incertezas.

4 OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GERAL

Simular a expansão da cobertura de coleta e tratamento de esgoto na Bacia Hidrográfica do Rio Cotia (BHRC), com base no Marco Legal do Saneamento, utilizando técnicas de análise espacial para avaliar o potencial de universalização na área de estudo.

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para alcançar o objetivo geral são propostos os seguintes objetivos específicos:

- Caracterizar o Sistema de Esgotamento Sanitário (SES) da área de estudo.
- Analisar a distribuição espaço-temporal da cobertura de coleta e tratamento de esgoto no período de 2008 a 2024.
- Delimitar a cobertura ideal para o SES universalizado na BHRC, segundo o Marco Legal do Saneamento Básico.
- Testar e elaborar um modelo de calibração de transição potencial das coberturas de coleta e tratamento de esgoto, com uso de variáveis explanatórias e modelos matemáticos, buscando o modelo mais representativo.
- Predizer o crescimento espaço-temporal do SES, como linhas de base 2029, 2033, 2040 e até o ano da universalização, considerando opções de limitação e estímulo de mudanças espaciais.
- Elaborar e determinar indicadores que demonstrem o comportamento das áreas simuladas.
- Comparar as áreas simuladas com as metas de universalização segundo referências pré-existentes.

5 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

5.1 SISTEMA DE ESGOTAMENTO SANITÁRIO

O Sistema de Esgotamento Sanitário (SES) é composto por um conjunto de estruturas e processos cujo objetivo é coletar, transportar e tratar o esgoto gerado em áreas antrópicas, assegurando sua disposição final de maneira adequada (VON SPERLING, 2016).

O funcionamento do SES começa nas redes coletoras, que são tubulações instaladas ao longo de ruas e avenidas para captar o esgoto gerado por residências, comércios e indústrias e instalações públicas. Essas redes conduzem o esgoto para tubulações maiores, chamadas coletores troncos, que agregam o fluxo de várias redes e direcionam o esgoto para tratamento (ACHON, 2020).

Segundo Chueiri et al. (2024), o SES é um componente essencial da infraestrutura urbana, pois protege os recursos hídricos, a saúde pública e contribui para a preservação ambiental, além de promover a qualidade de vida nas cidades.

Conforme Nuvolari (2011) e Von Sperling (2016), em alguns casos, devido às características do terreno, o esgoto precisa ser elevado para áreas mais altas a fim de continuar seu percurso. Para isso, são utilizadas as Estações Elevatórias de Esgoto (EEE), responsáveis por bombear o esgoto até um ponto onde ele possa ser transportado novamente por gravidade. Após percorrer os coletores tronco e, quando necessário, passar pelas estações elevatórias, o esgoto chega à Estação de Tratamento de Esgoto (ETE).

Na ETE, o esgoto passa por processos físicos, químicos e biológicos que visam remover contaminantes sólidos, líquidos e poluentes orgânicos e inorgânicos, tornando o efluente tratado adequado para ser descartado em corpos hídricos ou reutilizado em atividades industriais e agrícolas. O esgoto tratado pode ser lançado em rios, lagos ou no oceano, de acordo com os padrões ambientais vigentes (MIKI et al., 2022).

5.2 COBERTURA DE INFRAESTRUTURA

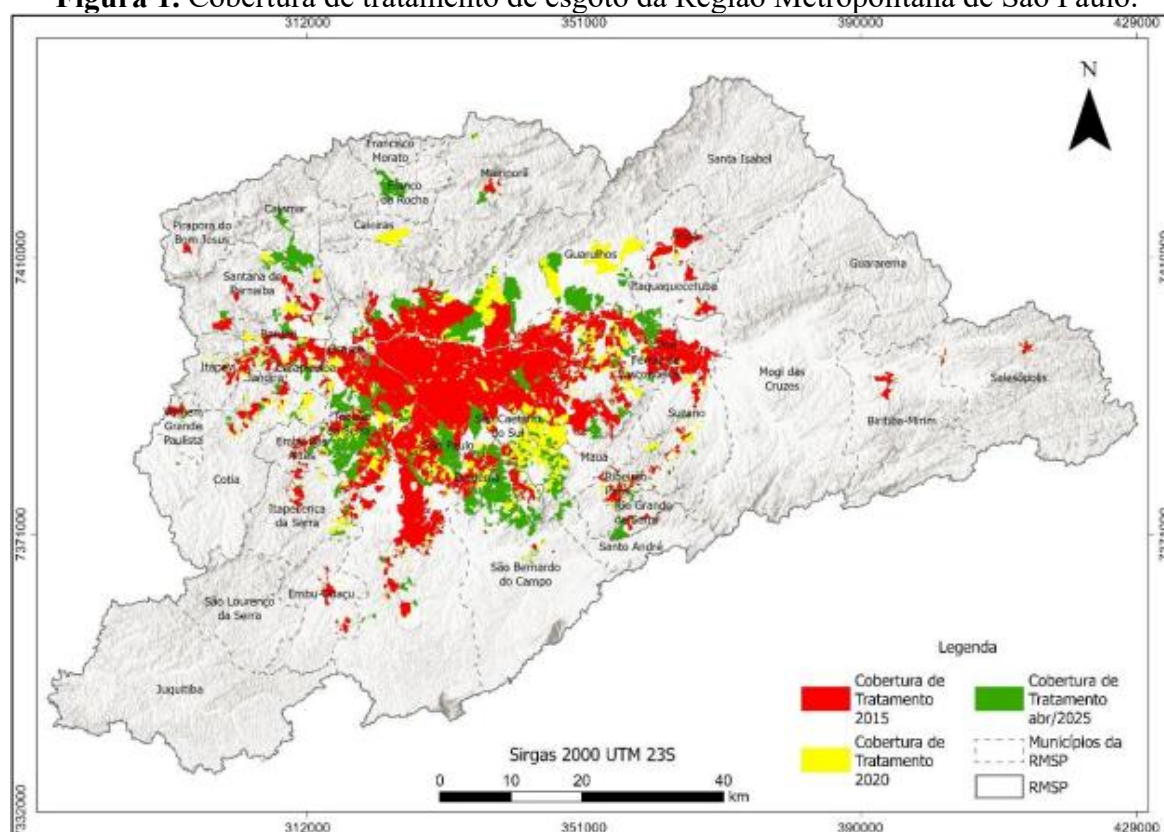
A cobertura de infraestrutura é uma delimitação geográfica e fictícia, que define as regiões onde determinado serviço público ou infraestrutura está disponível para atender a população. Esse conceito é amplamente utilizado em serviços de utilidade pública, como abastecimento de água, coleta de lixo, fornecimento de energia elétrica, drenagem de águas

pluviais, distribuição de gás liquefeito de petróleo (GLP) e esgotamento sanitário (SABESP, 2024c).

Segundo Toniolo et al. (2024a), no contexto de serviços de esgotamento sanitário, a cobertura refere-se à região onde a infraestrutura de coleta e tratamento de esgoto está instalada e disponível para a população. A delimitação desta área considera a presença de redes coletoras e de estações de tratamento de esgoto (ETEs), que são responsáveis por transportar e tratar os esgotos. A infraestrutura disponível permite que o esgoto gerado dentro dessa área seja coletado e tratado de forma adequada, evitando o lançamento direto em corpos d'água e contribuindo para a saúde pública e o meio ambiente.

A Figura 1 apresenta um exemplo de cobertura de infraestrutura, referente ao tratamento de esgoto na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), destacada na cor verde, para maio de 2025.

Figura 1. Cobertura de tratamento de esgoto da Região Metropolitana de São Paulo.



Fonte: Gregório et al. (2025).

Segundo Toniolo (2024b), a cobertura de serviços públicos, como o esgotamento sanitário, é influenciada por fatores como densidade populacional, topografia e planejamento urbano (SABESP, 2024a). No entanto, sua expansão não ocorre de forma automática ou

natural, uma vez que em áreas urbanas densamente povoadas, a cobertura tende a ser mais contínua, mas isso depende de decisões políticas, disponibilidade de recursos e prioridades institucionais (VIEIRA et al., 2024b). Já em áreas rurais ou periféricas, a prestação do serviço enfrenta desafios adicionais, como a ausência de infraestrutura, dificuldades de acesso e altos custos de implantação, o que pode resultar em lacunas significativas no atendimento (CUSTÓDIO, 2023).

No caso do esgotamento sanitário, a cobertura é frequentemente definida com base na proximidade das redes coletoras, normalmente utilizando buffers de 30 a 60 metros ao redor da rede existente. Essa proximidade é um critério importante para determinar se um imóvel pode ser atendido pelo serviço de esgotamento sanitário existente. Contudo, o conceito de cobertura pode ser aplicado a outros serviços públicos de maneira similar, considerando a proximidade ou disponibilidade de acesso à infraestrutura, como no caso de redes de distribuição de água ou de energia elétrica (SABESP, 2023).

Apesar da presença da infraestrutura, nem todos os imóveis localizados dentro da cobertura necessariamente fazem uso do serviço oferecido. Em muitos casos, questões como falta de adesão dos usuários, problemas técnicos ou ligações irregulares podem resultar em lacunas no atendimento, mesmo em regiões consideradas cobertas. Isso é particularmente relevante no esgotamento sanitário, onde conexões irregulares ou o não uso da rede coletora podem prejudicar os índices de cobertura efetiva (SABESP, 2024c).

No contexto da universalização, é importante distinguir cobertura de atendimento. A cobertura refere-se à existência da rede coletora disponível, enquanto o atendimento diz respeito à proporção de imóveis efetivamente conectados à essa rede em relação ao total de imóveis existentes. Dessa forma, a ausência de conexão à rede coletora ou a existência de conexões irregulares – entendidas como aquelas não registradas comercialmente no sistema da concessionária de saneamento – não impactam o índice de cobertura, mas sim o de atendimento.

A ampliação da cobertura de infraestrutura é uma condição essencial para a universalização dos serviços públicos, especialmente em áreas ainda desassistidas ou com infraestrutura precária. No caso do esgotamento sanitário, a universalização busca garantir o acesso de toda a população ao Sistema de Esgotamento Sanitário (SES), contribuindo para a redução dos impactos ambientais e sanitários. No entanto, alcançar esse objetivo envolve

desafios técnicos, financeiros e institucionais que vão além da simples execução de obras, exigindo planejamento integrado, priorização territorial e articulação entre diferentes esferas de governo (SABESP, 2024a; TONIOLO et al., 2024a).

Em termos de planejamento e gestão, a cobertura de infraestrutura é uma ferramenta fundamental para a análise da abrangência e eficiência de um serviço. Ao permitir uma visão geoespacial da disponibilidade de infraestrutura, facilita a identificação de lacunas e priorização de investimentos em locais que necessitam de maior atenção. Isso é válido tanto para serviços de esgoto quanto para outros sistemas de utilidade pública, como abastecimento de água, energia elétrica e coleta de lixo. Contudo, a despeito da importância da cobertura, ainda há pouca informação na literatura convencional a respeito dela, sendo mais explorada no meio corporativo (TONIOLO et al., 2023a).

5.3 UNIVERSLIZAÇÃO DO SANEAMENTO BÁSICO

A Lei Federal nº 14.026/2020, conhecida como o Novo Marco Legal do Saneamento Básico, estabelece metas ambiciosas para a universalização dos serviços de água e esgotamento sanitário no Brasil. De acordo com o marco, até 2033, 99% da população deve ter acesso à água potável e 90% deve ser atendida por serviços de esgotamento sanitário (BRASIL, 2020; INSTITUTO TRATA BRASIL, 2024).

Segundo o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2023), entre 2018 e 2022 o país apresentou uma evolução modesta nos indicadores do setor, com a cobertura de coleta de esgoto passando de 53,15% para 56,00% e o tratamento de esgoto evoluindo de 46,25% para 52,23%. Se o Brasil mantiver essa progressão até o prazo final estabelecido pelo Novo Marco (2033), o índice de cobertura para esgotamento será de apenas 65%, o que atrasaria a universalização para 2070.

A universalização do esgotamento sanitário exige, de fato, um conjunto complexo de ações técnicas, como a elaboração de estudos de concepção, projetos executivos, licenciamento ambiental e a execução de obras de infraestrutura — incluindo redes coletoras e estações de tratamento. No entanto, esse processo não se resume apenas à engenharia. Fatores institucionais, políticos e financeiros também desempenham um papel decisivo na viabilização dessas etapas. Diante da complexidade envolvida, é razoável considerar que os avanços nos indicadores de cobertura tendem a ocorrer de forma gradual, com resultados mais expressivos no médio e longo prazo (PAZ et al., 2021).

5.4 PARÂMETROS DO MARCO DO SANEAMENTO

O Novo Marco Legal do Saneamento Básico exige que as concessões de saneamento comprovem capacidade econômico-financeira para alcançar as metas de universalização. No Brasil, enquanto 1,7 mil municípios foram isentos dessa exigência, 2,9 mil estão regulares e 344 possuem restrições. Cerca de 579 municípios que não comprovaram capacidade econômico-financeira para o alcance das metas, afetando 10 milhões de pessoas, apresentam índices de saneamento abaixo da média: 68,88% têm acesso à água, 26,61% são cobertos com coleta de esgoto e 29,88% do esgoto é tratado. Além disso, perdem-se 47,33% da água nos sistemas de abastecimento (SNIS, 2023).

Municípios regulares investem R\$ 90 a mais por habitante, um valor três vezes superior aos irregulares, concentrados principalmente no Norte e Nordeste, com estados como Acre, Paraíba e Piauí apresentando mais de 55% de irregularidade, e Roraima com 100%. A comprovação da capacidade financeira é vital para garantir os investimentos necessários até 2033 (BRASIL, 2023a; INSTITUTO TRATA BRASIL, 2024).

Segundo Areal (2023), o Marco Legal do Saneamento incentivou a regionalização dos serviços, especialmente em regiões metropolitanas, para ampliar investimentos e viabilizar a universalização. Embora muitos estados tenham avançado com legislações, a implementação dos blocos regionais enfrenta entraves, como a sobreposição de prestadores e conflitos entre municípios. No caso de São Paulo, a atuação consolidada da Sabesp já configura, em parte, uma regionalização de fato, o que diferencia o estado no cenário nacional (INSTITUTO TRATA BRASIL, 2024).

Um dos objetivos do Novo Marco Legal do Saneamento foi atrair capital para aumentar os investimentos no setor, por meio de concessões dos serviços de água e esgoto ou parcerias público-privadas. Nos últimos anos, ocorreram licitações significativas, incluindo a de blocos regionais para prestação de serviços de saneamento, como por exemplo a privatização da Companhia Estadual de Águas e Esgotos do Rio de Janeiro (CEDAE) em, arrecadando cerca de R\$ 23 bilhões (INSTITUTO TRATA BRASIL, 2024).

Segundo SECOM (2024), a desestatização da Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (Sabesp) foi concluída em 23 de julho de 2024, resultando na captação de R\$ 14,7 bilhões, configurando-se como a maior oferta pública do Brasil e das Américas naquele ano. Esse processo visou antecipar a universalização dos serviços de saneamento de

2033 para 2029, com investimentos previstos de R\$ 69 bilhões até essa data, totalizando R\$ 260 bilhões até 2060. Ainda de acordo com SEMIL (2025), a Unidade Regional de Serviços de Abastecimento de Água Potável e Esgotamento Sanitário 1 – Sudeste (URAE 1 – Sudeste) que reúne 371 municípios operados pela Sabesp, passou a contar com um Conselho Deliberativo responsável por acompanhar metas e investimentos. No entanto, a integração dessa nova estrutura com os Comitês de Bacia Hidrográfica — instâncias já consolidadas na gestão dos recursos hídricos — ainda é um ponto de atenção, especialmente no que diz respeito à articulação entre planejamento regional e gestão ambiental (MARTINS e OTTONI, 2022).

5.5 INVESTIMENTOS PARA A UNIVERSALIZAÇÃO DO SANEAMENTO

O Plano Nacional de Saneamento Básico (Plansab) estima que são necessários aproximadamente R\$ 511 bilhões (a preços de dezembro de 2021) para atingir as metas de universalização do saneamento no Brasil. Ajustando para os preços de junho de 2022, esse valor sobe para R\$ 551 bilhões. Considerando os investimentos realizados em 2021 e 2022, que totalizaram R\$ 17,3 bilhões e R\$ 22,5 bilhões, restam ainda R\$ 509 bilhões a serem investidos. Para atingir a universalização até 2033, será necessário um investimento anual de R\$ 46,3 bilhões. Comparativamente, a média de investimentos nos últimos cinco anos foi de R\$ 20,9 bilhões anuais, o que indica que o valor precisaria mais que dobrar nos próximos anos para que as metas sejam cumpridas dentro do prazo legal (BRASIL, 2023b).

Os serviços de saneamento têm impactos amplos e positivos na sociedade, melhorando a qualidade de vida e o bem-estar da população, além de impulsionar o desenvolvimento econômico e social. Caso os investimentos anuais de R\$ 46,3 bilhões necessários para a universalização sejam realizados, a economia brasileira pode crescer cerca de R\$ 58,1 bilhões por ano no Produto Interno Bruto (PIB) (INSTITUTO TRATA BRASIL, 2024).

Desde 2020, o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) tem ampliado sua atuação no setor de saneamento, oferecendo assessoria técnica e estruturando licitações em estados como Rio de Janeiro, Alagoas, Amapá e Ceará (BNDES, 2024). Embora essas iniciativas representem um avanço na mobilização de recursos e na regionalização dos serviços, é importante reconhecer que os processos de concessão envolvem disputas políticas, interesses econômicos e desafios de regulação e controle social. A expectativa de novos projetos em estados com baixa cobertura deve ser acompanhada de

uma análise crítica sobre os modelos adotados e seus impactos nos territórios (WERNER e HIRT, 2021).

5.6 GEOPROCESSAMENTO

O geoprocessamento é uma tecnologia que utiliza sistemas de informação geográfica (SIG) e dados espaciais para coletar, analisar e visualizar informações georreferenciadas. Ele é amplamente aplicado em diversas áreas para facilitar o planejamento, a gestão e a tomada de decisões, permitindo a integração de dados de múltiplas fontes e a criação de modelos espaciais que auxiliam na identificação de padrões e tendências. Sua utilização é fundamental para o mapeamento preciso de infraestruturas, análise de territórios e monitoramento de processos dinâmicos, especialmente em ambientes urbanos e complexos (ABRAHÃO, 2020).

De acordo com Toniolo (2020a), nas companhias de saneamento, o geoprocessamento é aplicado para mapear redes de esgoto, planejar expansões e monitorar a eficiência dos sistemas. Com ele, é possível identificar áreas com necessidade de manutenção ou expansão, otimizar a alocação de recursos, e projetar o crescimento futuro da infraestrutura de saneamento, considerando a densidade populacional e o desenvolvimento urbano.

Além disso, as análises geoespaciais ajudam a monitorar perdas na rede e a prever impactos ambientais, permitindo que as companhias tomem decisões estratégicas para melhorar a cobertura e a eficiência dos serviços prestados (ARAGÃO, 2023).

5.7 MODELAGEM

Segundo Cruz et al. (2024), modelos são simplificações da realidade que destacam certos aspectos considerados essenciais para facilitar análises e apoiar a tomada de decisão. Essa simplificação, no entanto, implica necessariamente na exclusão de variáveis que, embora possam parecer menos relevantes à primeira vista, incluem fatores políticos, sociais e institucionais. Esses elementos, apesar de mais difíceis de quantificar, exercem forte influência sobre a dinâmica do saneamento básico e não devem ser negligenciados.

No caso do esgotamento sanitário, a modelagem pode ser útil para compreender tendências associadas ao crescimento populacional e à expansão urbana. Contudo, é fundamental reconhecer que todo modelo possui limitações, especialmente os modelos matemáticos, que enfrentam dificuldades para incorporar variáveis qualitativas e

imponderáveis — como decisões políticas, mudanças sociais abruptas ou eventos inesperados, a exemplo da pandemia de COVID-19, que impactou significativamente o planejamento e a operação dos sistemas de saneamento (SILVA et al., 2023; ALMEIDA e SEKI, 2024).

De acordo com Salvador e Arenales (2022), os modelos matemáticos – o tipo adotado nesta pesquisa – se destacam por sua capacidade de simular fenômenos de maneira quantitativa, utilizando equações e dados numéricos para prever comportamentos e tendências futuras. Por isso, são amplamente aplicados no planejamento de redes de esgotamento sanitário e na análise de impactos ambientais, permitindo calcular com precisão variáveis como o volume de esgoto gerado por uma determinada população ou o efeito de mudanças no uso do solo sobre a qualidade da água em uma bacia hidrográfica (OLIVEIRA, 2022).

De acordo com Bertone et al. (2014), a eficácia dos modelos matemáticos depende da qualidade dos dados e da compreensão do fenômeno estudado. Em contextos com incertezas, falta de informações ou forte influência de fatores políticos e sociais difíceis de prever, sua capacidade preditiva se reduz. Isso exige cautela na interpretação dos resultados, especialmente em temas complexos como a expansão do esgotamento sanitário, influenciada por decisões institucionais e dinâmicas sociais imprevisíveis (JAVARONI e SOARES, 2012).

Segundo Luiz e Steiken (2023), a modelagem com auxílio de geoprocessamento organiza os elementos mais relevantes da realidade para análises espaciais e simulações, como no planejamento de redes de esgoto. Ao combinar dados espaciais e matemáticos, essa abordagem permite prever comportamentos, avaliar impactos e ajustar modelos conforme novos dados, sendo especialmente útil em sistemas complexos. Ainda assim, é necessário cautela para não superestimar a capacidade dos modelos em representar integralmente a realidade, sobretudo em contextos marcados por incertezas e múltiplos interesses.

5.8 ANÁLISE DE MUDANÇA DE USO E COBERTURA DO SOLO

Segundo Pinheiro Neto et al. (2024), o uso do solo se refere às atividades humanas, como urbanização ou agricultura, enquanto a cobertura do solo trata das características físicas da superfície, como vegetação, água ou construções. O monitoramento das alterações na paisagem é crucial para entender as interações entre os seres humanos e o meio ambiente,

assim como para o planejamento territorial e a gestão sustentável dos recursos. Fazendo um paralelo com as coberturas de esgotamento sanitário, a análise de mudanças no uso e cobertura do solo é essencial para identificar onde há maior demanda por infraestrutura de esgotamento.

Mudanças no uso do solo, como o crescimento urbano ou a expansão de áreas industriais e residenciais, influenciam diretamente a necessidade de ampliar o SES. O monitoramento dessas áreas por meio de tecnologias como o sensoriamento remoto e o geoprocessamento permite a captura de dados espaciais e temporais, facilitando a identificação de novos locais que precisam ser incorporados ao sistema de esgotamento (TEIXEIRA e LUIZ, 2024).

Essas transformações no território, quando identificadas e analisadas em conjunto com a rede de esgotamento sanitário, fornecem informações valiosas para o planejamento das expansões necessárias. Por exemplo, áreas em rápida urbanização muitas vezes demandam uma ampliação acelerada dos serviços de esgoto, para evitar impactos ambientais negativos e garantir a saúde pública. Portanto, a análise das mudanças no uso do solo é fundamental para o planejamento de cobertura de esgotamento sanitário, permitindo uma gestão eficiente e sustentável do saneamento em regiões urbanas e rurais (PEIXOTO et al., 2021).

5.9 SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS FUTUROS

De acordo com Pavão (2017), a modelagem de predição de mudanças no uso e cobertura do solo é uma ferramenta crucial para o planejamento urbano e a formulação de políticas públicas, pois permite projetar cenários futuros com base nas dinâmicas passadas. No entanto, esse é um processo complexo, já que envolve características espaciais, dinâmicas, não lineares e de alta complexidade (LUIZ e STEIKEN, 2023).

Assim, esse tipo de modelagem exige a consideração de múltiplas variáveis interdependentes, muitas das quais estão associadas a funções de vizinhança, como os Autômatos Celulares (CA) e a Cadeia de Markov (MC), que assumem que os padrões de crescimento urbano observados no passado influenciam diretamente as tendências futuras por meio de interações locais (ROCHA, 2023).

Por essa razão, é essencial a incorporação de variáveis relevantes para o modelo, que possam explicar de forma adequada os processos de crescimento urbano. Entre essas

variáveis, destacam-se fatores como a topografia, proximidade de elementos físicos (redes de infraestrutura, rios, vias), indicadores sociais (densidade populacional, condições socioeconômicas), e a presença de assentamentos informais, entre outros. Essas variáveis permitem identificar tendências de expansão e ajudar na previsão de mudanças espaciais no período de análise (PAVÃO, 2017).

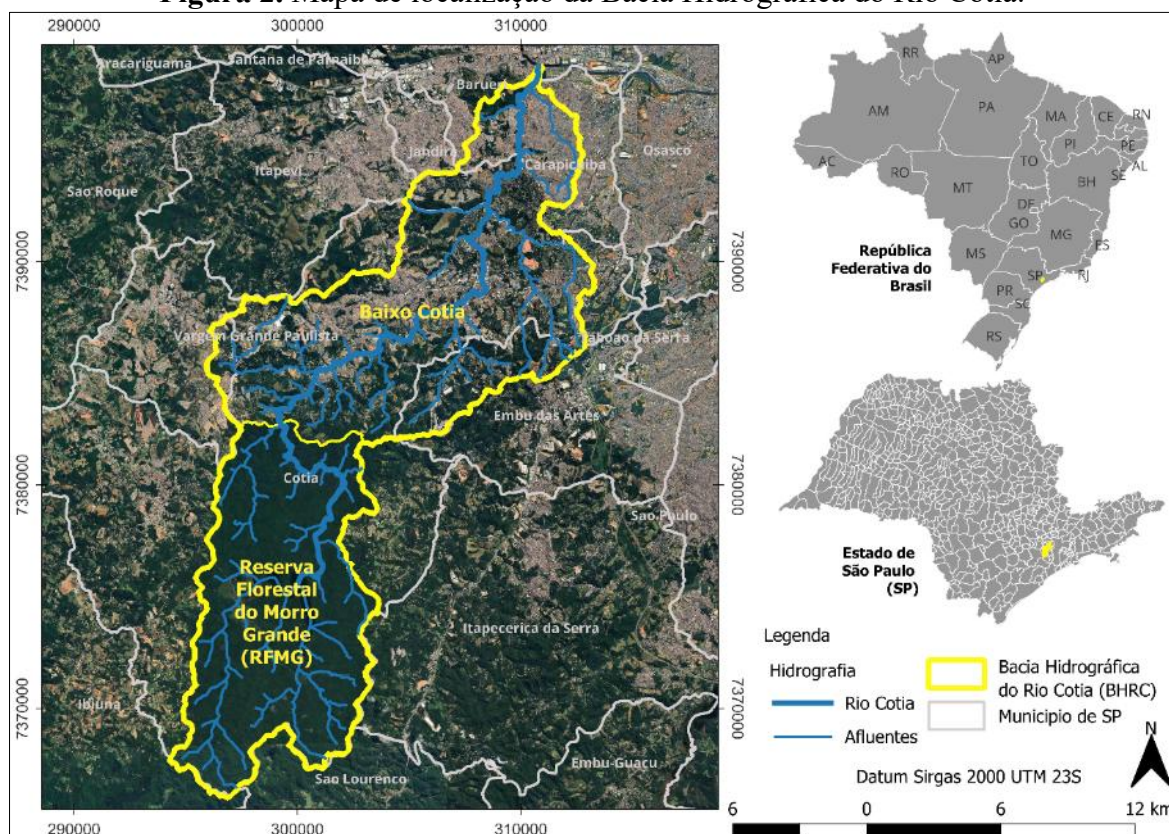
Existem diversos softwares de simulação de cenários preditivos disponíveis para realizar esse tipo de análise, cada um com suas particularidades e capacidades. Entre os mais conhecidos, destacam-se o Land Change Modeler (LCM), integrado à plataforma Terrset (Eastman et al., 2012), que é amplamente utilizado em estudos de mudanças de uso do solo; o Molusce, uma extensão do QGIS (NextGis, 2024) que oferece uma interface amigável para modelagem de mudanças de cobertura; o Dinamica EGO (Soares Filho, 1998), que possibilita simulações avançadas com uma gama de algoritmos customizáveis; o CLUE-S (Verbug et al., 2002), uma ferramenta orientada à simulação de uso do solo com foco em regiões complexas; e o TerraME (Carneiro, 2006), um software aplicado para modelagem espacial dinâmica. Esses programas fornecem análises avançadas de mudanças espaciais e temporais, sendo fundamentais para apoiar decisões informadas no planejamento territorial e na gestão de recursos urbanos (MANENTI, 2019).

6 MATERIAL E MÉTODOS

6.1 ÁREA DE ESTUDO

Para o desenvolvimento desta pesquisa, foi selecionada a Bacia Hidrográfica do Rio Cotia (BHRC), localizada na zona oeste da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), abrangendo os municípios de Barueri (2,80%), Carapicuíba (6,92%), Cotia (79,32%), Embu das Artes (7,01%), Jandira (2,81%) e Vargem Grande Paulista (1,15%). Com uma área de 251,36 km², a bacia é dividida em duas regiões com características próprias às suas diferenças físicas e ao estado de preservação ambiental: Baixo Cotia (147,20 km²) e Alto Cotia (104,16 km²), conforme a Figura 2 (SABESP, 2024c).

Figura 2. Mapa de localização da Bacia Hidrográfica do Rio Cotia.



Fonte: Autoria própria.

O Baixo Cotia apresenta um cenário altamente urbanizado, com córregos constantemente contaminados e assoreados, decorrentes de ocupação desordenada, falta de estrutura de saneamento básico e presença de atividades industriais, o que acaba comprometendo a qualidade da água tratada (IPT, 2005; SÃO PAULO, 2007).

De acordo com Metzger et al. (2006), a região do Alto Cotia sofre menor pressão antrópica devido à presença da Reserva Florestal do Morro Grande (RFMG), importante

remanescente de mata atlântica. Apesar disso, já foi impactada por desmatamentos e atividades extrativistas. A reserva abriga as nascentes do rio Cotia, as represas Pedro Beicht e Cachoeira da Graça, além do Sistema Produtor Alto Cotia, operado pela SABESP desde 1916.

Segundo o Censo Demográfico de 2022 (IBGE, 2024), a BHRC possui cerca de 495 mil habitantes. A bacia é cortada ao norte pela Rodovia Raposo Tavares (SP-270) e, próximo ao seu exutório, localiza-se a ETE Barueri, no rio Tietê, nas proximidades da Rodovia Castelo Branco (SP-280).

A bacia hidrográfica foi escolhida como unidade de análise por refletir a lógica do escoamento do Sistema de Esgotamento Sanitário (SES), que segue o curso do Rio Cotia por gravidade. A decisão também considerou a experiência prévia do pesquisador na área, adquirida em visitas de campo. Para fins metodológicos, o estudo foi delimitado ao Baixo Cotia, onde se localiza o SES, excluindo o Alto Cotia por ser área de proteção ambiental

6.2 SEQUÊNCIA METODOLÓGICA

A Figura 3 apresenta, de forma sintética, os procedimentos metodológicos desta pesquisa, adaptados do estudo de Pavão (2017), que consistiu na modelagem a análise de mudanças do uso do solo nas cercanias do Parque Estadual da Cantareira (São Paulo).

Figura 3. Fluxograma da metodologia.



Fonte: Autoria própria.

Os planos de informações (PI's) assim como os dados e materiais usados neste trabalho estão elencados na Tabela 1, ou seja, o levantamento de dados.

Tabela 1. Dados e materiais usados na pesquisa.

Plano de Informação (PI) / material	Descrição	Fonte	Acesso
Hidrografia	Camada vetorial dos cursos d'água de regime perene, vetorizada a partir de planta analógica em escala 1:10.000.	IGC (1979)	Público
Modelo Digital de Terreno (MDT)	Camada matricial cujo pixel representa uma altitude do terreno. Resolução espacial de 30 metros, advindo do <i>Forest And Buildings removed Copernicus DEM</i> (FabDEM v. 1.2).	Hawker e Neal (2021)	Público
Rede de esgoto	Camada vetorial do sistema linear de esgotamento existente que inclui rede coletora, coletor tronco, linha de recalque (esgoto bombeado) e interceptor.	Sabesp (2024c)	Privado
Rede de água	Camada vetorial do sistema de distribuição de água tratada existente. Não inclui o sistema de adução.	Sabesp (2024)	Privado
Empreendimentos imobiliários	Camada vetorial composta por polígonos que representam condomínios residenciais cobertos apenas por rede de água, sem cobertura de esgoto. Cada polígono contém atributos como vazões de projeto (água e esgoto), área, população prevista e situação da obra (existente, em projeto ou em construção).	Sabesp (2024c)	Privado
Instalações localizadas	Camada vetorial do tipo ponto que representa os sistemas localizados existentes do sistema de esgotamento que inclui: estações elevatórias de esgoto (EEE), estação de tratamento de esgoto (ETE), poço de visita (PV), poço de inspeção (PI), caixa de passagem (CP) e terminal de limpeza (TL).	Sabesp (2024c)	Privado
Redes a implantar	Camada vetorial composta por linhas que representam as obras necessárias para alcançar a universalização do sistema de esgotamento sanitário. Inclui obras estruturantes, como coletores-tronco e interceptores, além de obras de crescimento vegetativo, como redes coletoras, e também as Estações Elevatórias de Esgoto (EEE). Essa camada é derivada tanto de projetos executivos — que seguem critérios técnicos (redes com projeto) — quanto de estudos de concepção, que não possuem esses critérios (redes sem projeto).	Sabesp (2024c)	Privado
Lançamento de esgoto não tratado	Camada vetorial do tipo ponto que representa o despejo do esgoto não tratado – córrego, galeria de água pluvial, solo ou desconhecido.	Sabesp (2024c)	Privado
Ligação	Camada vetorial do tipo ponto que representa o tipo de ligação (TL) do imóvel à infraestrutura, sendo TL 0 conectada somente à rede de água, TL 1 conectada à rede de água e esgoto e TL 2 conectada somente à rede de esgoto. A ligação possui também a quantidade de economias que equivalem a unidades habitacionais. Exemplo: 1 prédio com 42	Sabesp (2024c)	Privado

Plano de Informação (PI) / material	Descrição	Fonte	Acesso
	apartamentos equivale respectivamente a 1 ligação e a 42 economias.		
Domicílio	Camada vetorial composta por pontos que representam os domicílios cadastrados no Censo Demográfico 2022. Cada ponto indica o tipo de domicílio — particular, coletivo ou comercial — e informa se está ou não coberto pelo Sistema de Esgotamento Sanitário (SES).	IBGE (2024)	Público
Setor censitário	Camada vetorial do tipo polígono que representa a menor divisão espacial para um censo demográfico. Possui os dados de população, quantidade de domicílios e densidade demográfica.	IBGE (2024)	Público
Vias	Camada vetorial do tipo linha que representa o eixo de logradouro como ruas, avenidas, estradas, vielas etc., vetorizada em escala 1:5.000.	CEM (2020)	Público
Transição de uso e ocupação do solo	Camada matricial que indica as mudanças nas classes de uso do solo na Bacia Hidrográfica do Rio Cotia (BHRC) entre 2002 e 2024, bem como as áreas de persistência (sem alteração). As classes consideradas são: Agropecuária, Área Urbana, Aterro Sanitário, Espelho d'Água, Favela, Indústria, Mineração, Pastagem, Reflorestamento, Solo Exposto e Vegetação Arbórea. O mapeamento de 2024 foi atualizado a partir do mapeamento de 2020, por fotointerpretação e delimitação manual. A análise de transição entre os dois anos foi realizada no software TerrSet, utilizando o módulo LCM	Adaptado de Toniolo (2020b)	Privado
Área de expansão	Camada vetorial do tipo polígono que representa os logradouros que não possuem rede coletora de esgoto e com a presença de imóveis com ligação somente de água (TL 0).	Sabesp (2024c)	Privado
Terrset liberaGIS	Software SIG usado para a simulação espacial. Contém o módulo LCM. Código livre.	Clark Labs (2024)	Público
QGIS 3.22	Software SIG usado para composição do banco de dados e confecção dos mapas temáticos. Código livre.	QGIS (2024)	Público
Arcgis Pro 3.1	Software SIG usado para composição do banco de dados e confecção dos mapas temáticos. Código proprietário.	Esri (2024)	Privado
Jamovi 2.3	Software estatístico. Código livre.	Jamovi (2024)	Público
Pacote Office 2016	Software com planilha eletrônica e editor de texto. Código proprietário.	Microsoft (2024)	Privado

Fonte: Autoria própria.

6.3 MONTAGEM DO BANCO DE DADOS GEOSPACIAIS

Compreende a elaboração de um *geodatabase* em grade estatística, no SIG, para a BHRC. Cada célula armazena atributos correspondentes às variáveis derivadas do Plano de Informações (PI), conforme Tabelas 1 a 3. Os valores originais das variáveis foram ajustados

às respectivas quadrículas — tornando-se coplanares — por meio da ferramenta Ligação Espacial do SIG, utilizando reamostragem cúbica. Para agregação, aplicou-se a média aritmética para variáveis quantitativas e a moda para variáveis qualitativas.

Esta grade estatística corresponde a uma matriz com 549 colunas por 635 linhas, totalizando 281.612 células de 30 m x 30 m. Cada variável foi posteriormente convertida para formato matricial (raster, geotiff). A criação da grade tem como objetivo uniformizar os valores das variáveis e garantir a sobreposição exata dos pixels, evitando erros de processamento nos softwares utilizados na metodologia. Além disso, facilita a integração de dados espaciais originalmente incompatíveis, conforme diretrizes do IBGE (2016).

6.4 DELIMITAÇÃO DA COBERTURA DO SES UNIVERSALIZADO

Compreende a criação de uma cobertura que represente o Sistema de Esgotamento Sanitário (SES) totalmente universalizado, de forma que todas as unidades habitacionais da BHRC tenham o esgoto coletado e tratado. A base dessa área será a cobertura de coleta de esgoto para o ano de 2024, à qual serão adicionadas as áreas de influência dos seguintes planos de informação (PI's):

- Ligações Sabesp TL 0 (somente água), tanto dentro quanto fora da cobertura;
- Domicílios particulares do IBGE não cobertos por rede coletora, considerando como cobertos aqueles localizados a até 20 metros da rede existente;
- Áreas de expansão (AEs), correspondentes a logradouros sem rede coletora existente, delimitadas por um buffer de 20 metros a partir do eixo do logradouro;
- Empreendimentos imobiliários, especialmente condomínios residenciais, em fase de construção ou projeto, ainda sem conexão à rede de esgoto. Devem obrigatoriamente ser classificados como TL 0 (somente água) e possuir sistema isolado de tratamento de esgoto, como fossa séptica ou estação compacta. Este PI foi identificado por meio de vistorias de campo realizadas entre janeiro e março de 2024;
- Áreas delimitadas por buffers de 20 a 100 metros a partir do eixo de logradouros e edifícios não cobertos pelas Áreas de Expansão (AE's);
- Áreas delimitadas por um buffer de 100 metros ao redor das obras de esgoto necessárias para atingir a universalização (redes a implantar);
- As classes de uso do solo Área Urbana, Indústria e Favela (TONIOLO, 2020b).

As áreas de influência foram definidas cruzando os PI's mencionados com a grade estatística do banco de dados espacial, utilizando as ferramentas Seleção por Localização e Ligação Espacial no SIG, com o predicado de interseção. Em seguida, a cobertura foi ajustada manualmente por fotointerpretação para reduzir a fragmentação dos pixels. Por fim, a área foi convertida para formato matricial (raster) para integração com as demais análises.

6.5 CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA DE ESGOTAMENTO SANITÁRIO

Compreende a descrição e espacialização dos elementos físicos, operacionais e hidráulicos do Sistema de Esgotamento Sanitário (SES) da BHRC, obtidos por meio de pesquisa bibliográfica, vistorias de campo e entrevistas com profissionais da Operação da SABESP. Os parâmetros levantados estão listados na Tabela 2, tendo como data-base junho de 2024. A conceituação desses parâmetros será apresentada na seção de Resultados. Essa etapa é fundamental para validar o comportamento do SES e fornecer subsídios informativos às fases seguintes da metodologia.

Tabela 2. Parâmetros abordados sobre a caracterização do Sistema de Esgotamento Sanitário.

Parâmetro	Descrição	Fonte
Cadastro técnico	Corresponde ao cadastramento dos ativos lineares (redes) e singularidades (peças) do SES no SIG corporativo.	Sabesp (2024c)
Cadastro comercial	Corresponde ao perfil do cliente (residência, comércio, indústria ou público), quantidade de economias, quantidade ligações, tipo de ligação, situação de esgoto da ligação, data de instalação da ligação e panorama da Classificação Nacional das Atividades Econômicas (CNAE).	Sabesp (2024c)
Lançamento de efluente não tratado	Camada vetorial que representa os lançamentos de esgoto não tratado cadastrados no SIG. Inclui também lançamentos potenciais confirmados por vistorias de campo realizadas entre janeiro de 2023 e março de 2024, identificados quando um ou mais trechos de rede coletora chegam ao poço de visita a montante, sem continuidade de rede a jusante. Além disso, contempla o polígono da área de contribuição associada a cada lançamento.	Sabesp (2024c)
Dados operacionais	Corresponde aos seguintes dados de cada trecho de rede: extensão de rede (km), profundidade da rede (m), data de instalação (ano), estado do ativo, diâmetro nominal (mm), tipo de material e tipo (rede coletora, coletor tronco, interceptor, linha de recalque etc.)	PMSP (2019) e Sabesp (2024c)
Redes a implantar	Corresponde à espacialização de obras lineares e localizadas necessárias para atender à universalização do SES, classificadas em dois tipos: obra (com projeto executivo) e sugerida (a se fazer o projeto executivo).	Sabesp (2024c)

Parâmetro	Descrição	Fonte
Dados hidráulicos	Corresponde aos dados de vazão de esgoto da sub bacia de esgoto “TO-13” da Sabesp (2024c), equivalente ao Baixo Cotia, gerados por meio do Modelo Topológico (Cobrape, 2010). A data base desse parâmetro é março de 2024.	Cobrape (2010) e Sabesp (2024c)
Manutenção	Corresponde ao histórico de desobstrução de redes coletoras e ramais domiciliares no período de maio de 2021 a junho de 2024.	Sabesp (2024c)
Uso e ocupação do solo (UOS)	Camada que representa a transição das classes de uso do solo entre 2002 e 2024. O mapeamento de UOS contempla 11 classes: agropecuária, área urbana, aterro sanitário, espelho d’água, favela, indústria, mineração, pastagem, reflorestamento, solo exposto e vegetação arbórea. A atualização foi realizada por fotointerpretação, com base no estudo de Toniolo (2020b), utilizando imagem aérea de março de 2024.	Adaptado de Toniolo (2020b)

Fonte: Autoria própria.

6.6 SIMULAÇÃO E PREDIÇÃO

Compreende as etapas de estudo de mudança das coberturas de esgotamento sanitário, potencial de transição, seleção das variáveis explanatórias, aplicação do modelo de potencial de transição, segundo o método adaptado de Pavão (2017), tendo como referência à similaridade da cobertura em função da expansão urbana.

O programa utilizado foi o TerrSet liberaGIS, no módulo Land Change Modeler (LCM), e a metodologia foi aplicada em duas frentes: para a cobertura de coleta de esgoto e para a cobertura de tratamento de esgoto.

Neste trabalho, foram consideradas três datas de referência para o estudo de mudança da cobertura de esgotamento sanitário: t1 (2008), correspondente à condição inicial observada; t2 (2016), representando a situação intermediária utilizada para o cálculo do potencial de transição; e t3, empregado em duas abordagens distintas.

No cenário de curto prazo, t3 (2024) corresponde à cobertura existente mais recente, utilizada para validação da simulação. Já no cenário de longo prazo, t3 (2025 a 2080) representa a cobertura universalizada do SES, conforme descrito na seção 6.4, adotada para projeção espacial da cobertura integral na BHRC.

A modelagem não inclui variáveis populacionais nem vetores de crescimento urbano, podendo restringir projeções de longo prazo. Além disso, representa a universalização sob a ótica da concessionária, desconsiderando sistemas isolados de esgotamento, como os operados por condomínios fechados.

6.6.1 ESTUDO DE MUDANÇA DA COBERTURA DE ESGOTAMENTO SANITÁRIO

Compreende o estudo do potencial de transição da área não coberta – coleta e tratamento – para a área coberta de um ano inicial t_1 para um ano final t_2 , no caso 2008 e 2016 respectivamente. O LCM fornece gráfico e mapa de alteração e de persistência entre as classes.

A análise de mudança servirá para a simulação e validação de uma cobertura existente em um ano de referência t_3 , que para este trabalho é 2024 (curto prazo) e 2025 a 2080 (longo prazo).

6.6.2 ESCOLHA DO SUBMODELO DE TRANSIÇÃO

Compreende a escolha da situação das duas transições possíveis entre as coberturas de esgotamento sanitário, que são (a) área não coberta para área coberta e (b) área coberta para área não coberta, de forma que o LCM exige a especificação destas transições.

Para este estudo, foi considerada apenas a transição (a), por refletir a expansão contínua do SES por meio de novas obras, visando atender ao crescimento constante da população na BHRC. A transição (b) não foi adotada, pois representa uma situação rara na prática: após a implantação do SES, sua operação é contínua e não sofre redução espacial, mesmo diante de manutenções recorrentes.

6.6.3 ESCOLHA DAS VARIÁVEIS EXPLANATÓRIAS

Compreende o desígnio adequado dos fatores do SES, que de alguma forma, influenciam no comportamento espacial da cobertura de coleta e tratamento de esgoto, isto é, o potencial explicativo de mudança de classe em determinado período.

A seleção das variáveis explanatórias fundamentou-se em uma consulta a 35 especialistas em saneamento básico que atuam direta ou indiretamente na Sabesp, distribuídos em 12 eixos de experiência. Essa diversidade de perfis conferiu ao questionário um caráter multidisciplinar, contribuindo para ampliar a qualidade e a precisão dos resultados obtidos.

O instrumento foi aplicado virtualmente, por meio da plataforma Google Forms, e estruturado segundo a escala de Likert (tipo importância) — técnica originalmente

desenvolvida por Rensis Likert em 1932 para mensuração de atitudes (COSTA JÚNIOR et al., 2024). A escala utilizada adotou pontuação de 1 a 7, onde 1 equivale a nenhuma importância e 7 equivale a extremamente importante.

Foram inicialmente apresentadas 31 variáveis, elaboradas com base na experiência do autor, sendo incorporadas às simulações somente aquelas que obtiveram média maior ou igual a 4 (importante). Variáveis com média entre 1 e 3 foram descartadas.

A Tabela 3 apresenta as dezessete variáveis aplicadas à simulação para determinar o potencial de transição e predição, de forma que a caracterização da relevância ambiental delas será discutida nos Resultados.

Tabela 3. Relação de variáveis explanatórias.

Nº	Variável	Unidade	Fonte
1	Consumo de água	m³/mês	Sabesp (2024c)
2	Declividade do terreno	%	Hawker e Neal (2021)
3	Densidade demográfica	hab./km²	IBGE (2024c)
4	Proximidade de ocorrência de manutenção em rede	m	Sabesp (2024c)
5	Proximidade das unidades não atendidas	m	IBGE (2024c) e Sabesp (2024)
6	Proximidade das áreas de expansão	m	Sabesp (2024c)
7	Proximidade de Estação de Tratamento de Esgoto (ETE)	m	Sabesp (2024c)
8	Proximidade de Estação Elevatórias de Esgoto (EEE)	m	Sabesp (2024c)
9	Proximidade de rede coletora	m	Sabesp (2024c)
10	Proximidade de rede de distribuição	m	Sabesp (2024c)
11	Proximidade dos empreendimentos imobiliários não atendidos	m	Sabesp (2024c)
12	Proximidade de vias e núcleos urbanos	m	CEM (2020) e Toniolo (2020b)
13	Proximidade de hidrografia	m	IGC (1979)
14	Transição do uso de ocupação do solo de 2002 para 2024	-	Toniolo (2020b)
15	Custo de universalização do SES	R\$	Sabesp (2024c)
16	Vazão de esgoto não tratado	m³/mês	Sabesp (2024c)
17	Proximidade de lançamento de efluente	m	Sabesp (2024c)

Fonte: Autoria própria.

Maiores detalhes sobre a construção do questionário, métricas e resultados podem ser conferidos nos Apêndices A, B e C.

6.6.4 ESCOLHA DO MODELO MATEMÁTICO DE POTENCIAL DE TRANSIÇÃO

Compreende a seleção de um dos seis modelos matemáticos disponíveis no LCM, com base nas duas situações de transição descritas na seção 6.6.2. O objetivo foi gerar mapas que representassem o potencial de transição para cada mudança, expressando a probabilidade temporal de ocorrência.

Foram definidos dois cenários de análise: um de curto prazo, considerando 2024 como referência para comparação com o sistema existente, e outro de longo prazo, projetado ao ano de 2025 a 2080, que corresponde ao horizonte máximo previsto no Contrato de Concessão da Sabesp (SEMIL, 2024). A Tabela 4 apresenta as características de cada modelo.

Tabela 4. Descrição dos modelos matemáticos de potencial de transição.

Nº	Modelo matemático	Notas
1	Multi-Layer Perceptron (MLP)	Rede neural artificial composta por múltiplas camadas (entrada, ocultas e saída), capaz de capturar relações complexas e não lineares entre variáveis. Utiliza funções de ativação e o algoritmo de retropropagação para ajustar pesos durante o treinamento. É altamente flexível e indicada para problemas com grande volume de dados e padrões espaciais complexos, embora exija maior tempo de processamento e ajuste de hiper parâmetros.
2	Decision Forest	Conjunto de árvores de decisão que trabalham de forma agregada (ensemble), reduzindo o risco de <i>overfitting</i> e aumentando a robustez do modelo. Cada árvore realiza classificações independentes, e o resultado final é obtido por votação ou média. É eficiente para dados heterogêneos e interpreta bem variáveis categóricas, mas pode perder precisão em padrões muito complexos.
3	Regressão Logística	Modelo estatístico baseado na função logística (sigmoide), que estima probabilidades de ocorrência de eventos binários ou multiclass. É rápido, interpretável e adequado para relações lineares entre variáveis explicativas e resposta. Limita-se em cenários com alta complexidade ou forte não linearidade, mas serve como referência por sua simplicidade e transparência.
4	Weighted Normalized Likelihood (WNL)	Método probabilístico que calcula a verossimilhança ponderada e normalizada das variáveis para estimar transições. É simples, direto e permite integração com diferentes tipos de dados, sendo útil para análises exploratórias e cenários com baixa disponibilidade de informações. Contudo, não captura interações complexas entre variáveis.
5	Support Vector Machine (SVM)	Algoritmo supervisionado que busca o hiperplano ótimo para separar classes, maximizando a margem entre elas. Utiliza funções kernel para lidar com dados não lineares, tornando-se eficaz em problemas complexos e com alta dimensionalidade.

Nº	Modelo matemático	Notas
		Apesar da precisão, pode ser sensível à escolha do kernel e ao custo computacional em grandes bases.
6	SimWeight	Método baseado em aprendizado por instâncias, que atribui pesos conforme a similaridade entre pixels e variáveis correlacionadas. É indicado para modelagem espacial, pois considera padrões locais e dependência espacial. Tem boa performance em cenários com variáveis fortemente correlacionadas, mas pode ser menos eficiente em grandes volumes de dados.

Fonte: Adaptado de Clark Labs (2024).

Todos os seis modelos foram testados, e os parâmetros de cada um foram ajustados por meio do processo de calibração no LCM. Para avaliação do desempenho, foram aplicados os indicadores descritos na Tabela 5. Além disso, os testes estatísticos Kappa e McNemar foram aplicados para validação dos mapas simulados, considerando um nível de significância de 0,05 (Tabela 6).

Tabela 5. Indicadores de desempenho de calibração.

Nº	Descrição	Equação	Notas
1	Índice de Concordância Kappa (K)	$K = \frac{P_o - P_e}{1 - P_e}$	Po é a proporção de pixels corretamente classificados e Pe é a proporção esperada de acertos ao acaso.
2	Acurácia Global (AG)	$AG = \frac{A}{B}$	Onde A é o total de pixels corretos e B é o total de pixels.
3	Precisão (P)	$P = \frac{VP}{VP + FP}$	Onde VP são os pixels verdadeiros positivos e FP são os pixels falsos positivos.
4	Teste Estatístico McNemar (χ^2)	$\chi^2 = \frac{(b - c)^2}{b + c}$	Onde “b” são as observações que mudaram de “negativo” para “positivo”; b são as observações contrária a “a”; e “b+c” é o total de pares discordantes. Avalia mudanças em distribuições binárias dependentes; contingência 2 x 2; grau 1 de liberdade.

Fonte: Solved (2024) e Jamovi (2024).

Tabela 6. Interpretação de p-valor dos indicadores Kappa e McNemar.

Aspecto	Kappa	McNemar
Hipótese Nula (H0)	A concordância observada entre as coberturas de coleta/tratamento simuladas e as reais não é maior do que a esperada pelo acaso ($K = 0$).	Não há diferença significativa entre a classificação de áreas entre dois momentos simulados (ou seja, $b = c$).
Hipótese Alternativa (Ha)	A concordância observada entre as áreas simuladas e reais é maior do que a esperada pelo acaso ($K > 0$).	Há diferença significativa entre a classificação de áreas entre dois momentos simulados ($b \neq c$).
Leitura do p-valor	p-valor pequeno ($< 0,05$): Rejeita H0, indicando concordância significativa entre áreas simuladas e observadas. p-valor grande ($\geq 0,05$): Não rejeita H0, indicando que a concordância pode ser explicada pelo acaso.	p-valor pequeno ($< 0,05$): Rejeita H0 indicando diferença significativa na transição das coberturas simuladas. p-valor grande ($\geq 0,05$): Não rejeita H0, indicando que as transições podem ser irrelevantes.

Fonte: Autoria própria.

O modelo final foi selecionado com base nos melhores resultados obtidos nos indicadores de desempenho e nos testes estatísticos, considerando sua adequação a ambos os cenários. Caso nenhum modelo se destacasse uniformemente, optar-se-ia por modelos distintos para cada cenário, priorizando a precisão e a robustez das projeções.

6.6.5 ESTUDO DE RESTRIÇÕES E INCENTIVOS DE CRESCIMENTO

Compreende os locais de restrições e incentivos para cada transição no modelo, devendo ser preenchido no LCM antes do painel de “Previsão de Mudanças”. A função trabalha com valor de 0 a 1, sendo zero (0) regiões com restrição total, ou seja, a transição não ocorre e um (1) regiões com incentivo livre, isto é, a transição ocorre sem qualquer impedimento. Valores intermediários oscilam proporcionalmente, sendo próximo a zero correspondente à maior dificuldade de transição e próximo a um, à maior facilidade (CLARK LABS, 2024).

Neste trabalho, para a cobertura universalizada foi atribuído o valor 1, sendo atribuído o valor 0 para o que está fora dela, isto é, regiões que possuem alguma restrição ambiental e não necessitam de cobertura de esgoto como a Reserva Florestal do Morro Grande, fragmentos florestais, Reservas Legais, Unidade de Conservação, Áreas de Preservação Permanente etc., não havendo valores intermediários (BRASIL, 2012).

6.6.6 ESTUDO DE PREVISÃO DE MUDANÇA ESPAÇO-TEMPORAL DO SES

Compreende a análise das transições do SES entre um instante inicial e um instante futuro definido, por meio do uso de cadeias de Markov. Nesse modelo, cada categoria de cobertura estadual representa um “estado”, e a probabilidade de transitar de um estado para outro no período seguinte é estimada a partir dos potenciais de transição históricos. O resultado é uma matriz de transição (P), cujas linhas somam 1 e cujos elementos p_{ij} indicam a probabilidade de que o estado i no tempo atual evolua para o estado j no próximo período (CLARK LABS, 2024).

Neste trabalho, realizaram-se simulações para diferentes anos de projeção com essas cadeias, com o objetivo de determinar probabilidades de transição aplicáveis no espaço temporal da BHRC. Os anos considerados incluem: a) 2024 (t_3) — usado para validação, pois possui cobertura observada; b) 2025; c) 2026; d) 2027; e) 2028; f) 2029; g) 2033 —

relevantes para o horizonte de universalização previsto no Estado de São Paulo (SEMIL, 2024); h) 2030; e i) 2040 — para avaliar o comportamento predito após o prazo limite operacional (PAVÃO, 2017).

As simulações foram estendidas para anos subsequentes até que a cobertura projetada atingisse a maior concordância espacial possível com a cobertura universalizada. Esse procedimento também permitiu avaliar a estabilidade do modelo em horizontes temporais mais longos, garantindo consistência nas projeções.

A etapa final compreendeu a análise espacial do ano previsto para cobertura de coleta e tratamento de esgoto, considerando os seguintes Planos de Informação (PI's): Rede de esgoto (somente tratamento), Rede a implantar, Empreendimentos imobiliários, Lançamento de esgoto não tratado e Ligação e Domicílio (variável proximidade de unidades não atendidas). Esses PI's foram cruzados no SIG com as coberturas simuladas para cada ano projetado até 2080.

Além disso, elaborou-se um cronograma de desembolso das obras necessárias para atingir a universalização na área de estudo (variável custo de universalização do SES), utilizando o Banco de Preços e Estimativas de Custos da Sabesp, com data-base de junho de 2024.

6.6.7 VALIDAÇÃO

Compreende a etapa de verificação da qualidade da cobertura simulada do SES a partir de uma cobertura de referência, por meio de tabulação cruzada, o que resulta em um mapa de concordância espacial entre os dados simulados e observados. Esse mapa evidencia as seguintes condições: a) acerto (*hits*) – o modelo previu alteração e a alteração foi observada; b) erro (*miss*) – o modelo previu persistência e a alteração foi observada; e c) alarme falso (*fals alarm*) – o modelo previu alteração e foi observada persistência.

Para a cobertura de referência, adotou-se, no cenário de curto prazo, a cobertura existente de 2024 do SES, enquanto no cenário de longo prazo foi utilizada a cobertura universalizada.

A validação foi aplicada a todas as simulações por ano, conforme seção 6.6.6, com exceção da simulação dos anos de 2024 e 2060 que, adicionalmente, receberam a aplicação dos índices de desempenho, elencados anteriormente nas Tabelas 5 e 6.

6.7 DETERMINAÇÃO DE INDICADORES DE ESGOTAMENTO SANITÁRIO

Compreende o comportamento das variáveis relacionadas às coberturas de coleta e tratamento de esgoto, visando avaliar o progresso da universalização do saneamento por meio dos indicadores descritos no Tabela 7.

Tabela 7. Indicadores espaciais das áreas simuladas.

Nº	Ind.	Equação	Notas
1	IRL (%)	$IRL = \frac{LE}{LI} \times 100$	Onde IRL é o Índice de Redução de Lançamentos; LE é o total de lançamentos eliminados, ou seja, dentro da cobertura de tratamento; e LI são os lançamentos iniciais, de 2024.
2	ICC (%)	$ICC = \frac{DC}{DT} \times 100$	Onde ICC é o Índice de Cobertura de Coleta de Esgoto; DC são os domicílios particulares cobertos pela coleta; e DT é o total de domicílios particulares.
3	ICT (%)	$ICT = \frac{DTa}{DT} \times 100$	Onde ICT é o Índice de Cobertura de Tratamento de Esgoto; DTa são os domicílios particulares cobertos pelo tratamento; e DT é o total de domicílios particulares.
4	IPV (%)	$IPV = \frac{TL_0}{TL_{0total}} \times 100$	Onde IPV é o Índice de Potencial de Virada; TL ₀ são as ligações somente de água dentro da cobertura de coleta; e TL _{0total} é o total de ligações de TL ₀ no Baixo Cotia.
5	IAP (%)	$IAP = \frac{\sum(AI_i \times DD_i)}{Pop.} \times 100$	Onde IAP é o Índice de Atendimento Populacional; AI _i é a área do setor censitário i interseccionada pela cobertura de coleta; DD _i é a densidade demográfica do setor censitário i; e Pop. é a total de habitantes no Baixo Cotia.
6	ICH (%)	$ICH = \frac{L_t}{L_c} \times 100$	Onde ICH é o Índice de Cobertura Hidrográfica; L _t é a extensão, em km, dos corpos hídricos perenes dentro da cobertura de tratamento; L _c é a extensão de corpos hídricos perenes dentro da cobertura de coleta.
7	TEC (%)	$TEC = \frac{C_{at} - C_{ant}}{C_{ant}} \times 100$	Onde TEC é a Taxa de Expansão de Cobertura; C _{at} é a cobertura no ano atual; e C _{atant} é a cobertura no ano anterior. Calculado para coleta e tratamento.
8	IVNT (%)	$IVNT = \frac{\sum VENT_i}{\sum VEC_i} \times 100$	Onde IVNT é o Índice de Vazão de Esgoto Não Tratado; VENT _i é a Volume de Esgoto Não Tratado gerados pelas ligações TL que estão dentro da cobertura de coleta, mas fora da cobertura de tratamento; e VEC _i é o Volume de Esgoto Coletado gerado pelas ligações TL dentro da cobertura de coleta.

Fonte: Autoria própria.

Os cálculos foram realizados para o ano de 2024, referência atual, e para anos projetados, como 2029, 2033 e 2040 etc., utilizando técnicas de geoprocessamento para processar os dados espaciais e calcular os indicadores.

Cada indicador oferece uma métrica específica para avaliar diferentes aspectos da expansão das coberturas. Assim, o IRL mede a redução de lançamentos de esgoto não tratado, enquanto o ICE e o ICT indicam a proporção de domicílios cobertos pela coleta e tratamento, respectivamente. Por sua vez, o IAP estima a população beneficiada pelo SES e o IPV analisa a transição do tipo de ligação do imóvel: de TL 0 (somente água) para água e esgoto (TL 1). Já ICH avalia o percentual de corpos hídricos protegidos por coberturas de tratamento. O IVNT verifica os lançamentos de esgoto que deveriam ser tratados, mas por algum motivo têm destinação diferente, como em galerias de águas pluviais (GAP), solo ou corpos hídricos. Por fim, a TEC monitora a taxa de crescimento das coberturas.

6.8 COMPARAÇÃO DOS DADOS SIMULADOS COM OS DADOS PRÉ EXISTENTES

Compreende o cálculo dos indicadores ICC e ICT – uma vez que são equivalentes, respectivamente, ao Indicador de Cobertura do Serviço de Coleta (ICE) e ao Indicador de Cobertura do Serviço de Tratamento de Esgoto (IEC) que constam no novo Contrato de Concessão da Sabesp (SEMIL, 2024) –, em função do referencial progressivo de incremento de economias da universalização do Contrato de Concessão, conforme consta na Tabela 8.

Estes indicadores foram adaptados do Anexo II – Caderno Técnico do Contrato de Concessão, referente à desestatização da Sabesp (SEMIL, 2024).

Tabela 8. Metas de universalização.

Ano	Indicador de Cobertura do Serviço de Coleta (ICE)	Indicador de Cobertura de Serviço de Tratamento de Esgoto (IEC)
2024	61%	38%
2025	62%	39%
2026	72%	40%
2027	80%	50%
2028	87%	51%
2029	87,5%	53%
2033	88%	61%
2040	88,3%	75%
2050	89%	80%
2060	90%	90%

Fonte: Adaptado de SEMIL (2024).

O cálculo do ICC e ICT também foi feito por tipo de recorte territorial do setor censitário, os quais são Formal – equivalente a Área Urbana –, Rural e Informal – equivalente a Favela –, originários do Censo Demográfico de 2022 (IBGE, 2022), conforme também exigência do Contrato de Concessão. Assim foi calculado um indicador global, correspondente à área total da BHRC e mais três, sendo um para cada recorte territorial.

A contagem dos domicílios como dentro ou fora da área de abrangência foram feitos em SIG, pelo comando Ligação Espacial. O crescimento demográfico não foi considerado nesta aplicação, em função da complexidade da espacialização desse fenômeno. Os indicadores foram espacializados e discutidos.

Compreende, também, o crescimento das redes coletoras do SES da BHRC, por ano, considerando o PI Redes a Implantar (ver Tabela 1), o qual foi comparado e discutido com os dados adaptados da Tabela 9, referentes aos quantitativos físicos previstos em expansão de redes coletoras (SEMIL, 2024).

Tabela 9. Acréscimo de extensão de rede coletora prevista (metros), por ano.

Ano	Recorte Urbano	Recorte Informal	Recorte Rural
2025	8.000	13.500	NA
2026	55.000	500	NA
2027	40.000	500	NA
2028	35.000	500	NA
2029	15.000	500	NA
2033	45.000	1.500	NA
2040	30.000	1.000	NA
2050	50.000	500	NA
2060	20.000	1.500	NA

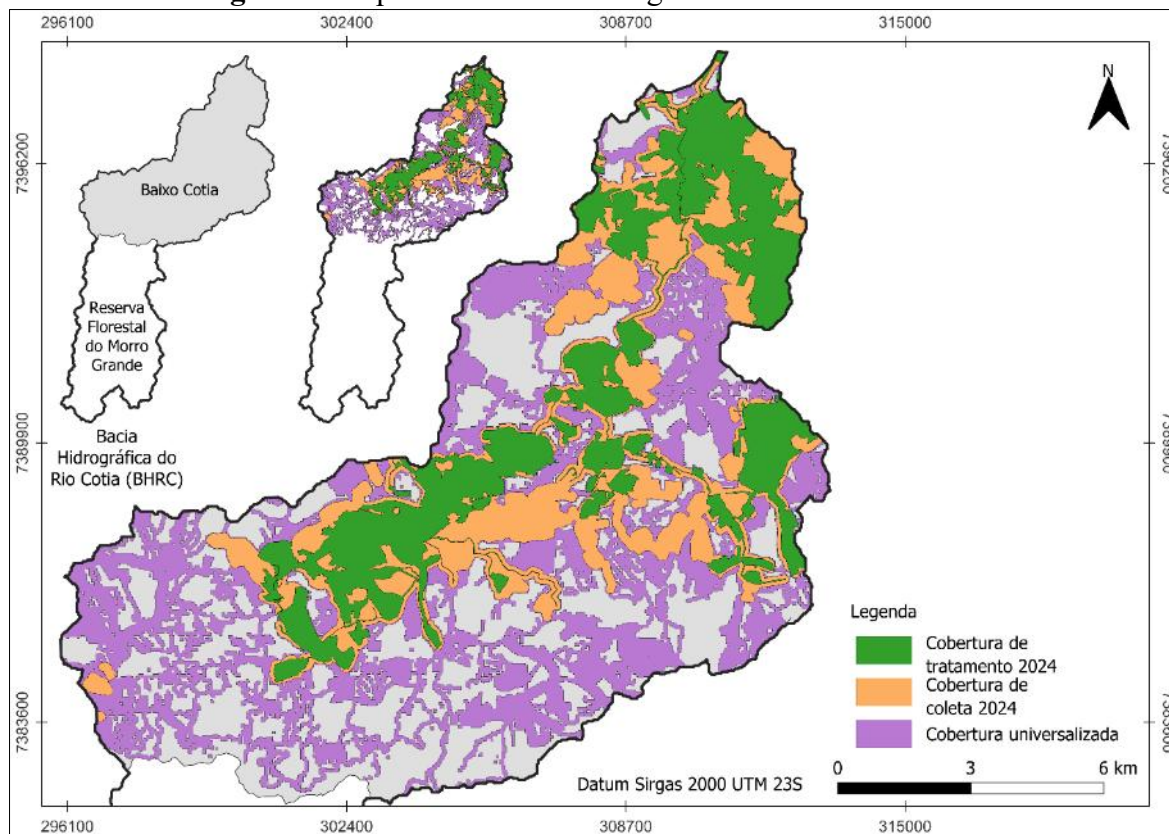
Legenda: NA = não se aplica. Fonte: Adaptado de SEMIL (2024).

7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

7.1 ANÁLISE DA COBERTURA UNIVERSALIZADA

A cobertura universalizada totaliza 105,31 km² (Figura 4), que é equivalente a 41,90% da área da BHRC e a 71,54% do Baixo Cotia, abrangendo as zonas urbanas, áreas de expansão e empreendimentos imobiliários distribuídos ao longo de toda a BHRC.

Figura 4. Mapa da cobertura de esgotamento universalizada.



Fonte: Autoria própria.

Verifica-se pela Figura 4 que a cobertura universalizada apresenta maior densidade nas áreas centrais e urbanas da bacia, onde a infraestrutura existente facilita a conexão e ampliação do sistema. Em contrapartida, as regiões periféricas destacam-se como áreas que dependem da expansão planejada para alcançar o atendimento universal.

A cobertura universalizada apresentada na Figura 4 possui uma geometria complexa que reflete diretamente a dinâmica espacial das infraestruturas do SES na BHRC. Diferentemente de áreas compactas e contínuas, nota-se que a cobertura universalizada apresenta uma estrutura altamente ramificada, característica semelhante às redes coletoras existentes. A área delimitada não é composta exclusivamente por polígonos compactos e

isolados, mas sim por trechos lineares e contíguos que acompanham os logradouros situados na bacia, representando arruamentos que não possuem atendimento de esgotamento sanitário.

A despeito da fragmentação aparente da cobertura universalizada (Figura 4), esta possui contiguidade e conectividade, a qual é uma característica crucial para o planejamento de um SES funcional, assegurando que todas as áreas conectadas tenham acesso tanto à coleta como ao tratamento do esgoto.

Em relação às métricas de paisagem observadas na Figura 4, percebe-se que a cobertura universalizada possui alto índice de forma em função de suas bordas irregulares e ramificações. Ela demonstra adaptabilidade ao território, garantindo conectividade entre trechos dispersos e alta densidade linear nas áreas urbanas. Verifica-se também que a relação área e perímetro é elevada, evidenciada pelas extensas ramificações, assim como o coeficiente de agregação é maior em zonas urbanas e menor em áreas compactas.

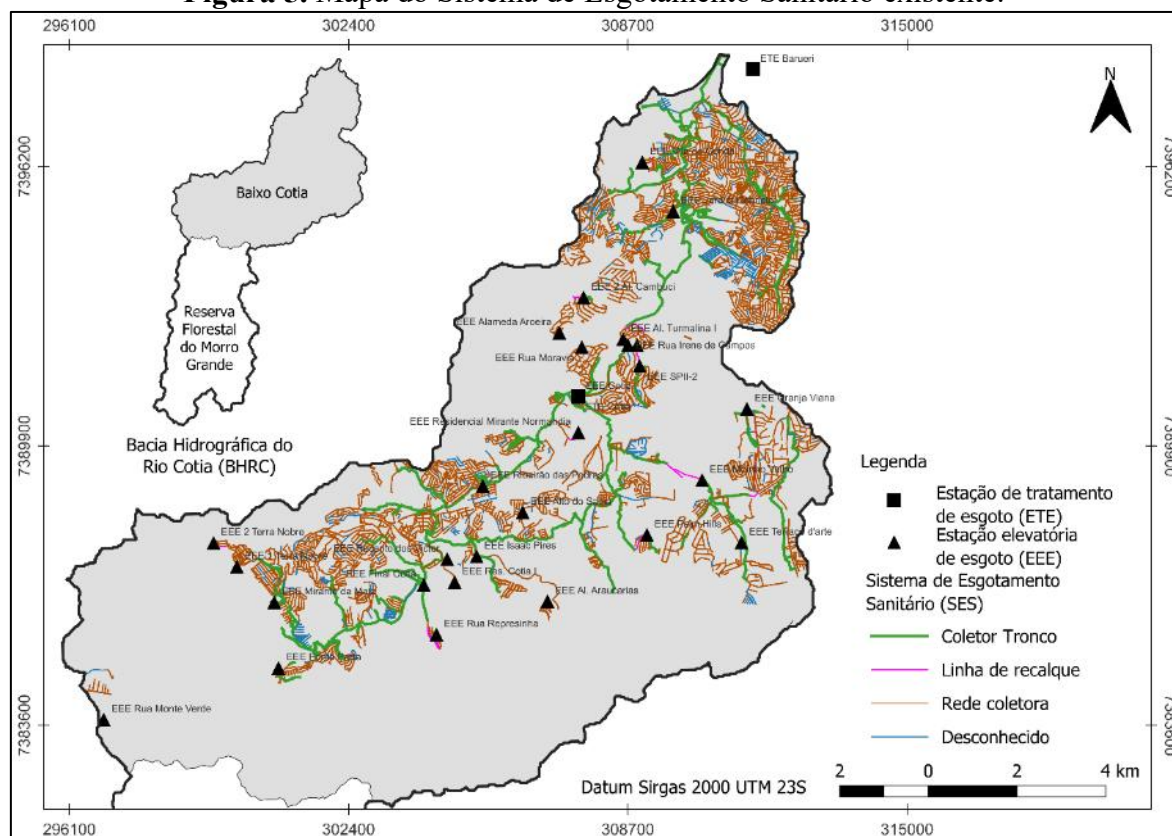
Ressalta-se que a cobertura universalizada (Figura 4) é aplicável em ambos os planos da modelagem, isto é, coleta e tratamento, garantindo uma lógica operacional em que o esgoto coletado seja transportado para tratamento de forma eficiente e dentro dos prazos previstos em dados pré-existentes (SEMIL, 2024).

A cobertura universalizada do SES traz impactos positivos diretos na redução de lançamentos de esgoto não tratado e na melhoria da qualidade da água dos corpos hídricos da bacia. Socialmente, a inclusão de áreas de favelas e de expansão urbana garante maior equidade no acesso ao saneamento básico, promovendo saúde pública e qualidade de vida. Além disso, o mapeamento dessa cobertura evidencia um planejamento estratégico bem estruturado, que integra múltiplos elementos do sistema de saneamento para alcançar a universalização (CAPOBIANCO et al., 2024).

7.2 CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA DE ESGOTAMENTO SANITÁRIO

A Figura 5 apresenta o mapa do Sistema de Esgotamento Sanitário (SES) da área de estudo, com destaque para as redes, estações de tratamento de esgoto (ETE) e estações elevatórias de esgoto (EEE), conforme legenda.

Figura 5. Mapa do Sistema de Esgotamento Sanitário existente.



Fonte: Autoria própria.

Analisando a Figura 5, verifica-se que todo esgoto coletado na BHRC é enviado para tratamento à ETE Barueri, de forma que é possível identificar a ETE Cotia, porém de caráter complementar. Existem diversas ETEs compactas na BHRC, geralmente situadas em condomínios fechados que não são de responsabilidade da Sabesp.

A Figura 5 aponta que em relação à extensão de redes por tipo em km, o SES está classificado da seguinte forma, considerando as tubulações que estão em operação, isto é, ativas: 111,80 km de coletor tronco (CT), 65,37 km de redes de origem desconhecida – que não possuem cadastro técnico e/ou documentação –, 9,71 km de linha de recalque – que são redes pressurizadas – e 552,02 km de redes coletoras, totalizando uma extensão de 738,9 km na data base de junho de 2024.

Ainda analisando a Figura 5, verifica-se que existem 28 EEE's em funcionamento, cujo objetivo é conduzir o esgoto por pressão aos CTs através de linha de recalque, uma vez que a declividade do terreno não é favorável para condução por gravidade.

A Figura 5 exhibe que o SES da BHRC possui uma alta conectividade, reforçando o tratamento do esgoto, contudo é possível identificar tubulações isoladas, isto é, que não estão

interligadas ao sistema de afastamento (coletores tronco e interceptores) e, assim, ou estão fora da cobertura de tratamento ou possuem sistema isolado (SABESP, 2024a).

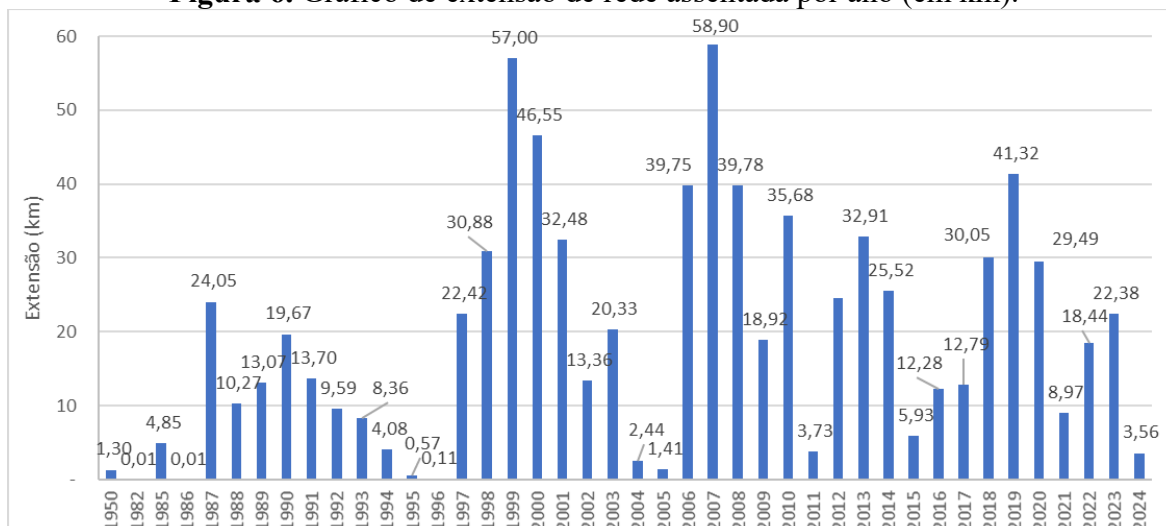
A despeito da Figura 5 apresentar somente as redes coletoras em operação na BHRC, existem redes em outros estados conforme a classificação a seguir: Abandonada (extensão de 24,91 km) é quando a tubulação não possui mais condições de operar, em função da obsolescência e péssimo estado de conservação; Construída (6,13 km) é quando a tubulação está em plena condições de uso, mas por algum motivo ainda não está em uso; Em construção (1,14 km) é quando a rede está em execução ainda, em fase de obra; e Excluída (28,42 km) é quando a rede foi vetorizada de forma errada no SIG Corporativo da Sabesp, o qual não permite “deletar” a vetorização para manter o histórico de edição (SABESP, 2024b).

Em relação ao diâmetro nominal (DN) das redes coletoras, o SES da BHRC possui uma grande variedade, entre em 50 mm e 2.000 mm, sendo que a predominância é de 150 mm com uma extensão total de aproximadamente 460 km, seguido do DN de 200 mm com extensão aproximada de 204 km, de forma que em 16,10% do SES corresponde à coleta do esgoto e somente 83,9% corresponde ao afastamento.

Em relação à profundidade das redes do SES, a média é de 2,20 m para afastamento e 1,45 m para coleta, de forma que a profundidade dos poços de visita pode variar de 90 cm a 16 m dependendo da topografia. Em relação ao material das redes, esses podem ser de cimento amianto (CA) com distribuição de 1% em relação ao total, manilha de barro vidrado (MBV – cerâmico) com 37%, ferro fundido (FoFo) com 2%, polietileno de alta densidade (PEAD) com 4%, policloreto de vinila (PVC) com 53% e concreto simples (CE) com 3%.

Em relação às peças que conectam trechos da rede de esgoto, existem quatro tipos: Caixa de Passagem (CP) que são dispositivos que não permitem inspeção visual com um total de 598 unidades, Poço de Inspeção (PI) com 10.165 unidades, Poço de Visita (PV) que permitem entrada do operador para manutenção no sistema com 6.866 unidades e Terminal de Limpeza (TL) com 1.187 unidades, totalizando 18.816 peças. Ressalta-se que as peças de esgoto são fundamentais para se fazer a manutenção das redes coletoras como desobstrução, lavagem, reparo etc. (TONIOLO et al., 2024b).

Em relação à data de instalação das redes, a Figura 6 mostra um gráfico da extensão de redes assentadas, em km por ano.

Figura 6. Gráfico de extensão de rede assentada por ano (em km).

Fonte: Autoria própria.

Observa-se na Figura 6 que, até a década de 1980, a instalação de redes era bastante limitada, com extensões anuais inferiores a 5 km na maioria dos anos. Um aumento significativo ocorre a partir de 1985, quando a extensão anual alcança 24,05 km, refletindo um esforço inicial para expandir a infraestrutura de saneamento na bacia.

Na década de 1990 (Figura 6), observa-se evolução relativamente constante, com picos em 1997 (30,88 km) e 1999 (57,00 km), evidenciando investimentos públicos significativos nesse período. O maior salto ocorre em 2006, com 58,90 km, apontando o ápice da expansão da rede coletora. Esse contexto está alinhado a políticas federais de saneamento como o Pronurb, o Pro-Saneamento e o Prosege, que integraram linhas de crédito e programas focados em redes coletoras e áreas de baixa renda (SALLES, 2009).

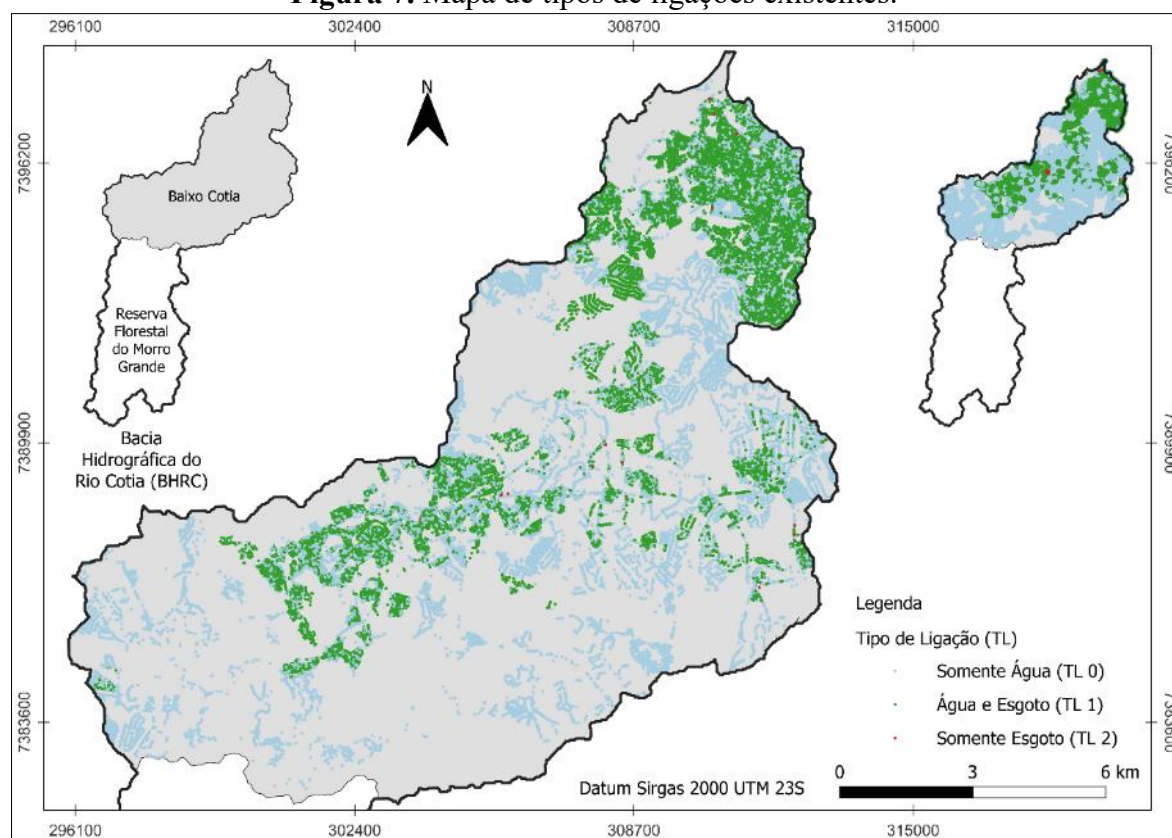
Após 2006, conforme apresenta a Figura 6, observa-se uma tendência de declínio na extensão anual instalada, embora períodos de recuperação sejam notados, como em 2010 (32,91 km) e 2018 (41,32 km). No entanto, os últimos anos, de 2020 a maio de 2024, mostram uma redução considerável nas extensões instaladas, com valores abaixo de 30 km anuais, como os 3,56 km registrados em 2024, sugerindo uma desaceleração nos investimentos em expansão da infraestrutura.

Por fim, a variação verificada na Figura 6 ao longo dos anos reflete não apenas os ciclos de financiamento e políticas públicas, mas também os desafios técnicos e logísticos para implantação de redes em áreas mais complexas, como zonas rurais e urbanas informais.

Outra informação relevante do SES é a origem da informação das redes, isto é, se possuem cadastro técnico ou algum documento que comprovem sua existência: cerca de 8,8% das redes não possuem qualquer informação a respeito de sua instalação (tipo Desconhecido) e 91,2% possuem documentação. Esta proporção corrobora os esforços do Sabesp em manter a confiabilidade dos seus dados por meio de uma eficiente gestão de ativos (TONIOLO et al., 2023b).

A Figura 7 apresenta o mapa de tipo de ligação (TL) situadas na BHRC, que corresponde aos imóveis conectados somente à rede de água (TL 0), somente a rede de esgoto (TL 2) ou em ambas (TL 1).

Figura 7. Mapa de tipos de ligações existentes.



Fonte: Autoria própria.

Conforme apresenta a Figura 7, existe um total de 130.231 ligações Sabesp ativas na BHRC, sendo 42.275 TL 0 (cor azul), 87.902 TL 1 (cor verde) e somente 54 TL 2. As ligações TL 0 são as conexões estratégicas para aumentar a cobertura de esgotamento sanitário, por meio de execução de obras, isto é, a camada vetorial Redes a implantar. Este conceito na Sabesp é chamado de Potencial de Virada: é a possibilidade de uma ligação TL

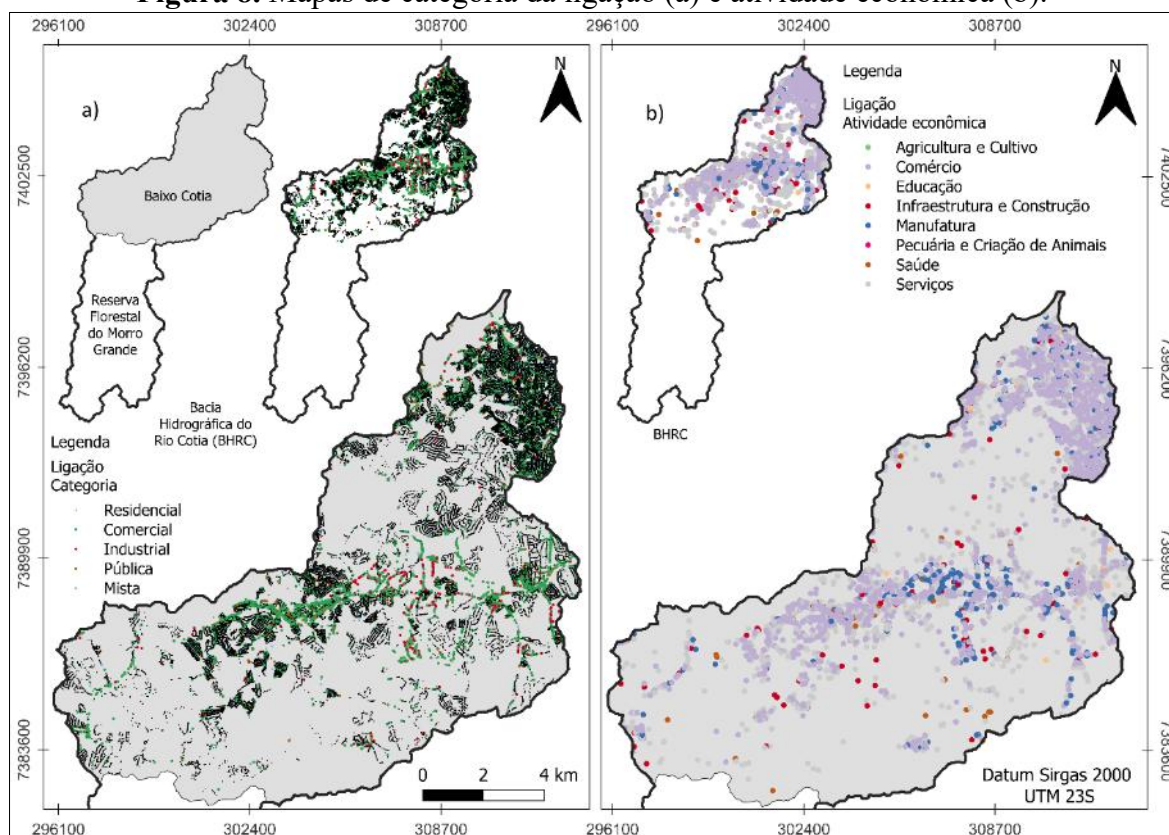
0 se transformar em TL 1 por meio de ações corporativas (SABESP, 2023), ou seja, o imóvel que possui somente conexão de rede de água passa a ter o esgoto também coletado e tratado.

Pela Figura 7, verifica-se que as ligações TL 0 estão dispostas de forma sucessiva no logradouro, isto é, uma forte indicação de que não existe rede coletora instalada no arruamento. Há casos em que a ligação TL 0 está entre ligações TL 1 – nestes casos existe rede coletora no logradouro, mas por algum motivo o imóvel não está conectado à tubulação, possuindo fossa ou despejando o esgoto de forma irregular (solo ou GAP).

Ressalta-se que uma ligação pode ter várias economias, ou seja, um prédio residencial seria a ligação e os seus apartamentos seriam as economias. Desta forma, a BHRC possui um total de 176.031 economias, o que resulta em um fator de 1,35 economias / ligação. Este fator é usado pela Sabesp para fazer estimativas de projeção (SABESP, 2024a).

A Figura 8 apresenta os mapas de categoria da TL (8a) e atividade econômica (8b) exclusivamente para as categorias Comércio e Indústria (8b).

Figura 8. Mapas de categoria da ligação (a) e atividade econômica (b).



Fonte: Autoria própria.

No mapa da Figura 8a, percebe-se uma alta concentração de ligações comerciais e industriais nas áreas urbanas mais densas, especialmente nas regiões centrais e sul da bacia, onde também há uma significativa sobreposição com ligações residenciais. As ligações comerciais estão dispersas, refletindo a capilaridade dessa atividade econômica, enquanto as ligações industriais se destacam em polos específicos, principalmente próximas a eixos viários e áreas industriais delimitadas. Essa configuração reflete o padrão de ocupação do solo e o desenvolvimento econômico das áreas urbanas formais da bacia.

O mapa da Figura 8b reforça essa distribuição ao apresentar as atividades econômicas associadas às ligações. As atividades de comércio aparecem amplamente distribuídas em áreas urbanas consolidadas, enquanto a manufatura e a infraestrutura e construção se concentram em polos industriais e zonas de transição urbana. Essa segmentação também evidencia a presença de atividades econômicas relacionadas à agricultura e pecuária nas áreas rurais, embora com menor densidade em comparação aos setores urbanos. Ressalta-se que as oito divisões dispostas na legenda foram adaptadas para fins de fácil interpretação, de mais de 400 classes originalmente, conforme Classificação Nacional de Atividades Econômicas (CNAE) (SABESP, 2024c).

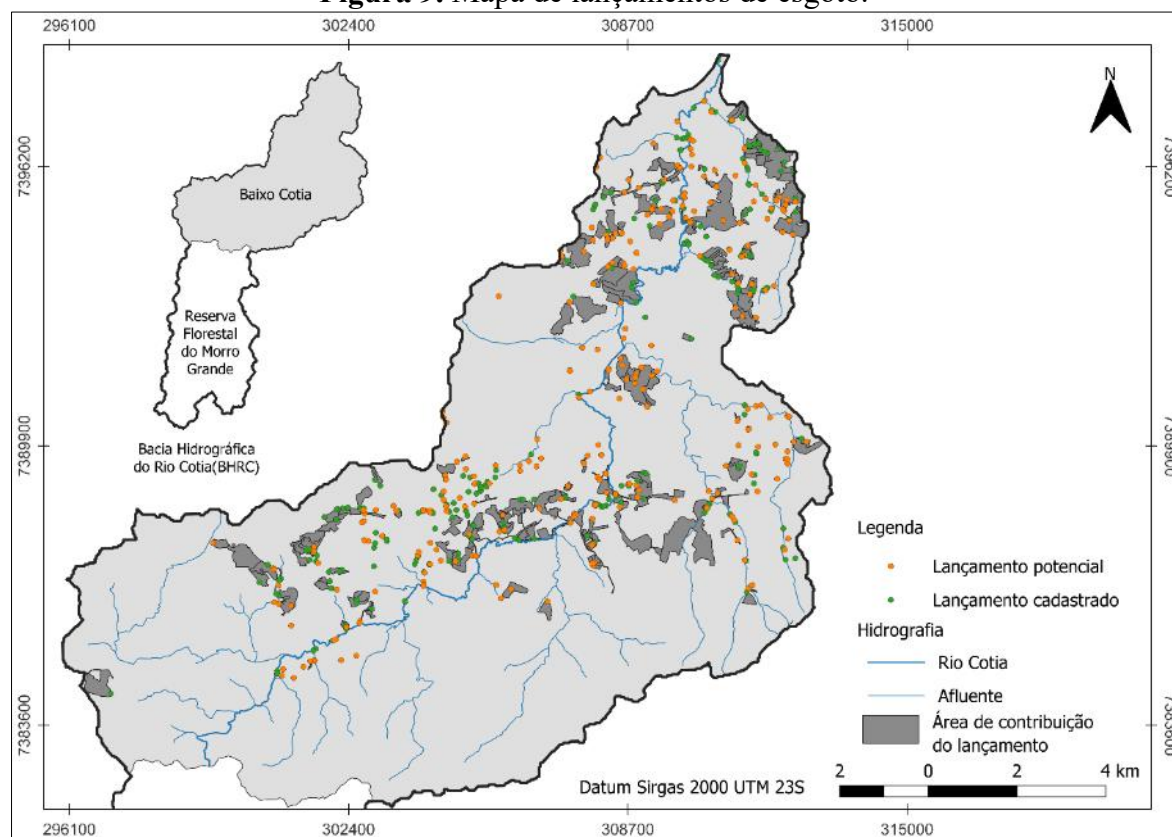
A análise da Figura 8a apresenta a seguinte distribuição das categorias de TL: 121.825 ligações do tipo residencial (cor preto), 5.984 ligações do tipo comercial (cor verde), 588 ligações do tipo industrial (cor vermelho), 349 ligações do tipo público (cor marrom) e 1.485 ligações do tipo misto (geralmente residencial com comercial). Em relação às economias por categoria, temos a seguinte configuração: 167.654 economias residenciais, 7.406 economias comerciais, 620 economias industriais e 351 economias públicas.

O mapa da Figura 8b apresenta um total de 7.142 ligações comerciais e industriais com a seguinte distribuição de atividade econômica: 2 unidades para Agricultura e Cultivo, 3.709 unidades de Comércio, 60 unidades de Educação, 141 unidades de Infraestrutura e Construção, 497 unidades de Manufatura, 3 unidades de Pecuária e Criação de Animais, 164 unidades de Saúde e 2.566 unidades de Serviços.

A Figura 9 apresenta os lançamentos de esgoto assim como suas respectivas áreas de contribuição, totalizando 180 pontos de lançamento. Destes, 89 lançamentos se caracterizam como potenciais, isto é, não estão registrados no SIG corporativo da Sabesp, mas sua

existência foi constatada em vistoria de campo, conforme trabalho de Toniolo et al. (2023b), e 91 se caracterizam como lançamentos cadastrados, devidamente registrados no SIG.

Figura 9. Mapa de lançamentos de esgoto.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 9 evidencia um aspecto notável que é a proximidade de muitos desses pontos com a rede hidrográfica da bacia, incluindo o Rio Cotia e seus afluentes, o que destaca a relevância desses lançamentos para a qualidade dos recursos hídricos e a gestão ambiental. A sobreposição de áreas de contribuição com a hidrografia demonstra a potencial conexão desses lançamentos com corpos d'água, reforçando a necessidade de controle e regularização para evitar impactos negativos, como a poluição por lançamento de esgoto não tratado (MEDEIROS et al., 2017).

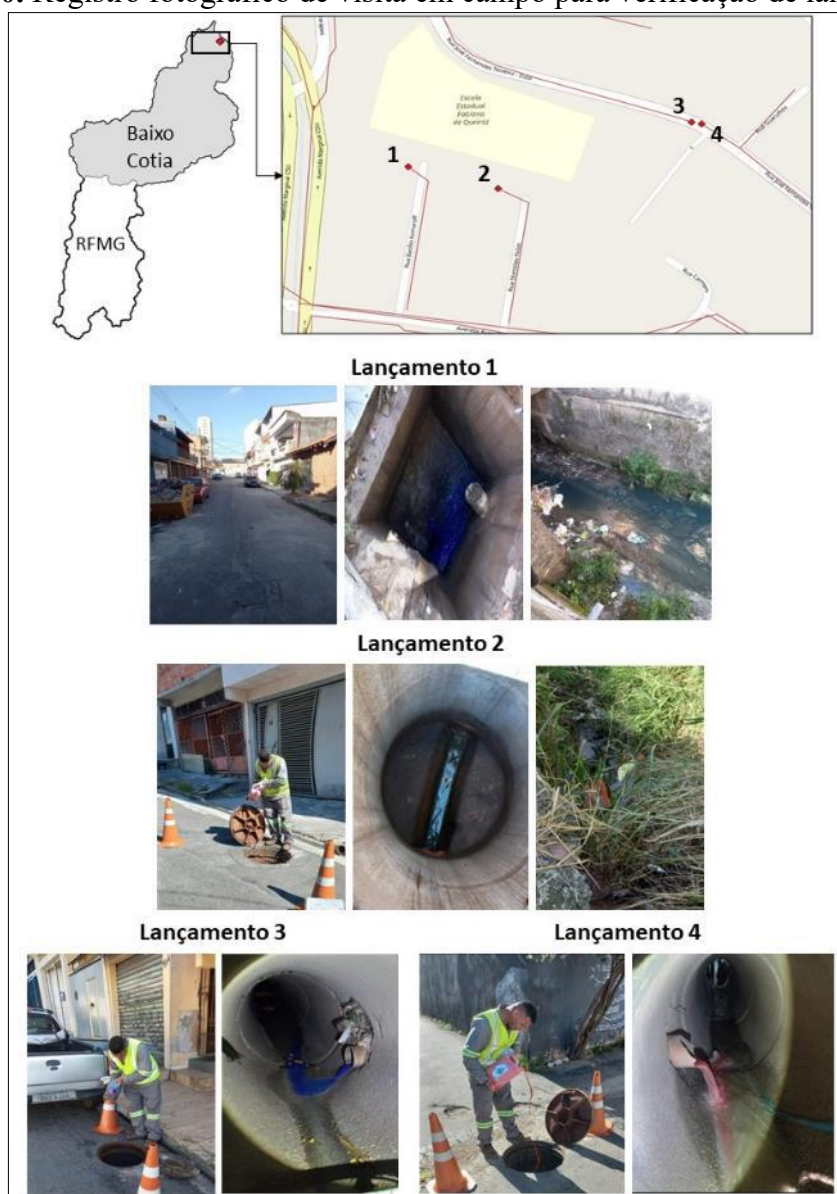
A Figura 9 corrobora que a concentração de lançamentos em regiões próximas ao Rio Cotia e afluentes reflete o padrão de ocupação e a dependência da hidrografia para drenagem de esgoto, o que é comum em bacias com ocupação consolidada. No entanto, isso também destaca o risco ambiental associado à falta de tratamento adequado, especialmente nos lançamentos potenciais, que podem ser fontes de contaminação para a água superficial. Essa

proximidade exige maior atenção na integração desses pontos ao SES, garantindo que os esgotos sejam captados e conduzidos a ETE (KLIGERMAN et al., 2023).

Analisando a Figura 9, verifica-se uma área de contribuição total de 1.155,49 hectares, sendo 449,43 hectares de lançamento cadastrado (38,90%) e 706,06 hectares de lançamento potencial (61,10%). Essa configuração revela um significativo volume de áreas onde o esgoto é lançado sem tratamento adequado, com 61% desse total ainda em potencial, o que reforça a necessidade de ações corretivas.

A Figura 10 apresenta registro fotográfico de vistoria em campo de quatro lançamentos potenciais, confirmando a situação que a rede coletora não conduz o esgoto para a ETE.

Figura 10. Registro fotográfico de visita em campo para verificação de lançamentos.



Fonte: Autoria própria.

Ao analisar a Figura 10, observa-se a aplicação do teste com corante para confirmar os lançamentos potenciais. Nos Lançamentos 1 e 2, os corantes azul e vermelho, respectivamente, foram despejados em um córrego retificado e em um córrego natural. Já nos Lançamentos 3 e 4, os mesmos corantes (azul e vermelho) foram aplicados em uma galeria de águas pluviais (GAP). Dessa forma, conclui-se que os quatro lançamentos vistoriados demandam soluções de engenharia para serem devidamente interligados e conduzirem os efluentes para tratamento adequado.

A Tabela 10 apresenta os dados operacionais a respeito do total das áreas de contribuição.

Tabela 10. Dados operacionais das áreas de contribuição dos lançamentos de esgoto.

Dados	Área de Contribuição do Lançamento		
	Cadastrado	Potencial	Total
Área (he)	449,43	706,06	1.155,49
Economia Residencial	16.309	17.149	33.458
Economia Comercial	633	604	1.237
Economia Industrial	37	52	89
Economia Pública	43	23	66
Ligação	13.190	13.958	27.148
Consumo médio de água (m³/mês)	182.262,88	209.659,76	391.922,64
Vazão de esgoto (L/s)	56,25	64,71	120,96

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 10 apresenta dados sobre as áreas de contribuição para lançamentos de esgoto, que representam locais onde o esgoto é coletado, mas não tratado, sendo situações indesejáveis do ponto de vista ambiental e de saneamento. Em termos de economia, a maior parte dessas áreas está associada a usos residenciais, com 33.458 unidades no total (16.309 cadastradas e 17.149 potenciais), o que evidencia a vulnerabilidade de áreas habitadas ao impacto ambiental do lançamento inadequado de esgoto. As economias Comercial (1.237 unidades), Industrial (89 unidades) e Pública (66 unidades) têm uma menor participação, mas ainda contribuem para o problema.

Ainda analisando a Tabela 10, verifica-se que as ligações (todos TLs inclusos) nessas áreas totalizam 27.148 unidades, com 13.190 ligações já cadastradas e 13.958 ligações potenciais, evidenciando que cerca de 51% podem estar incorporado a sistemas inadequados de disposição. O consumo médio de água associado a essas áreas é significativo, alcançando 391.922,64 m³/mês, com uma vazão de esgoto de 120,96 L/s, dos quais 56,25 L/s são cadastrados e 64,71 L/s potenciais.

Esses dados reforçam a urgência de ações para eliminar essas áreas de contribuição, seja ampliando a rede de coleta e tratamento ou implementando tecnologias locais para tratar o esgoto antes do lançamento. A predominância de economias residenciais torna ainda mais crítico o impacto ambiental e social desse problema (MIKI et al., 2022).

A magnitude dos impactos ambientais decorrentes do lançamento de esgoto não tratado é evidenciada pelo estudo de Medeiros et al. (2017), que identificou severa degradação da qualidade da água na Bacia do Rio Piracicaba (SP) em função de conexões clandestinas de esgoto em redes pluviais. Foram observados valores de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) superiores a 100 mg/L, concentrações elevadas de fósforo e nitrogênio, além de densidades críticas de *Escherichia coli*, indicando forte contaminação microbiológica. Adicionalmente, constatou-se a presença de metais pesados — como Zn, Ni, Cu, Cr e Pb — em níveis acima dos limites estabelecidos por normas ambientais, configurando risco potencial para usos múltiplos da água, incluindo irrigação e dessedentação animal.

Esses resultados reforçam a correlação entre ausência de infraestrutura adequada e degradação dos corpos hídricos, corroborando a necessidade de estratégias integradas de saneamento para mitigação de poluição difusa e pontual (MEDEIROS et al., 2017).

A Tabela 11 apresenta os dados hidráulicos gerados a partir do Modelo Topológico (Cobrape, 2010; Sabesp, 2024), considerando a subárea de esgoto denominada “TO-13”, que é equivalente ao Baixo Cotia e data base de março de 2024.

Tabela 11. Dados de vazão de esgoto do Baixo Cotia.

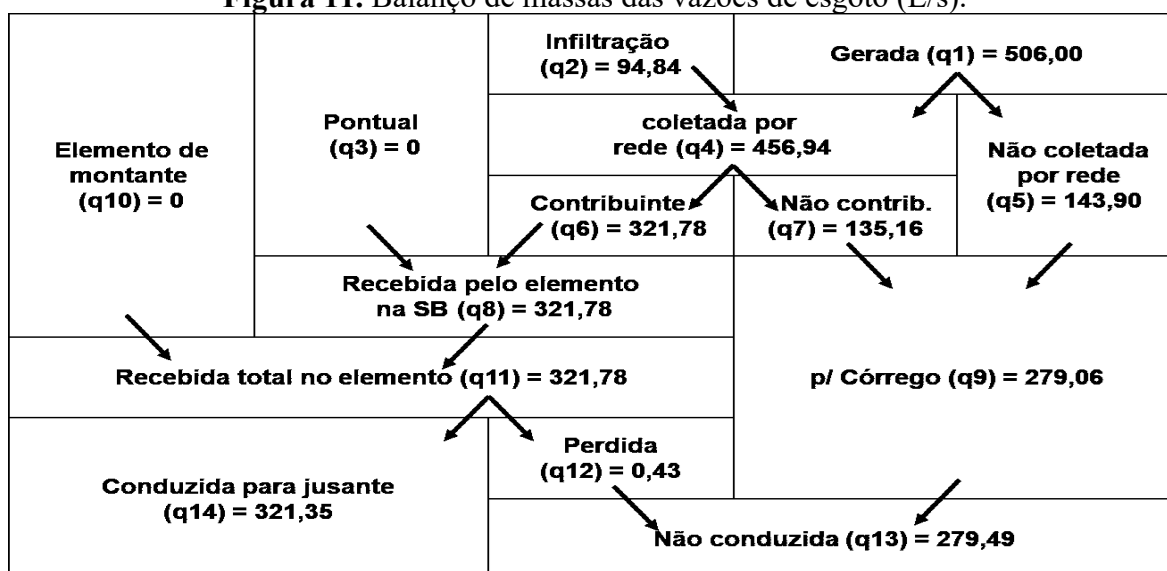
Dado	Valor	Nota
Vazão gerada - q1 - (L/s)	506,00	80% do micromedido das economias residenciais.
Vazão infiltração - q2 - (L/s)	94,84	Contribuição do lençol freático na rede coletora.
Vazão pontual - q3 - (L/s)	0,00	Contribuição específica de um empreendimento não atendido pela Sabesp (fábrica, município não operado).
Vazão coletada - q4 - (L/s)	456,94	$q4 = q2 + q1 - q5$
Vazão não coletada - q5 - (L/s)	143,90	Uma parte de q1
Vazão contribuinte - q6 - (L/s)	321,78	Esgoto conduzido para o elemento de jusante.
Vazão não contribuinte - q7 - (L/s)	135,16	Lançamento de esgoto não tratado.
Vazão recebida na sub bacia - q8 - (L/s)	321,78	$q3 + q6$
Vazão p/ córrego - q9 (L/s)	279,06	$q7 + q5$
Vazão recebida da sub bacia de montante - q10 - (L/s)	0,00	Contribuição de um trecho do sistema de afastamento.

Dado	Valor	Nota
Vazão recebida total - q11 - (L/s)	321,78	q10 + q8
Vazão perdida - q12 - (L/s)	0,43	Extravasamento, vazamento.
Vazão não conduzida - q13 - (L/s)	279,49	q12 + q9
Vazão conduzida - q14 - (L/s)	321,35	Esgoto conduzido para o elemento de jusante.
Consumo micromedido de água TL 0 e TL 1 (m³/mês)	2.401.168	Soma do consumo das economias residenciais com conexão de rede de água e esgoto.
Consumo micromedido de água TL 1 (m³/mês)	1.602.088	Soma do consumo das economias residenciais com conexão somente de água.
Consumo micromedido de água dentro da cobertura de tratamento (m³/mês)	1.213.714	Excluído consumo fora da cobertura.

Fonte: Adaptado de Cobrape (2010) e Sabesp (2024c).

A Figura 11 apresenta o balanço de massa das vazões apresentadas na Tabela 11.

Figura 11. Balanço de massas das vazões de esgoto (L/s).



Fonte: Adaptado de Cobrape (2010) e Sabesp (2024c).

A Tabela 11 e o balanço de massa (Figura 11) apresentam uma visão detalhada dos fluxos hidráulicos no sistema de esgotamento sanitário, permitindo uma análise integrada e precisa. A vazão gerada ($q_1 = 506,00$ L/s) representa o total de esgoto produzido na sub-bacia, sendo dividida entre a vazão coletada pela rede ($q_4 = 456,94$ L/s) e a vazão não coletada ($q_5 = 143,90$ L/s). Isso evidencia que aproximadamente 28,4% do esgoto gerado não é captado, resultando em lançamentos diretos no meio ambiente, o que demonstra uma deficiência significativa na infraestrutura de coleta.

A vazão coletada (q_4), que corresponde a 90,3% da vazão gerada, é composta pela soma da vazão contribuinte ($q_6 = 321,78$ L/s) e da vazão não contribuinte ($q_7 = 135,16$ L/s). A vazão contribuinte é o volume efetivamente conduzido para tratamento ou jusante,

enquanto a vazão não contribuinte, que corresponde a 29,6% do total coletado, representa perdas no sistema, como extravasamentos, infiltrações ou volumes que não chegam às ETEs. A elevada proporção de vazão não contribuinte reflete a necessidade de melhorias na manutenção e operação do sistema de coleta.

A vazão recebida na sub-bacia ($q_8 = 321,78 \text{ L/s}$) é inteiramente composta pela vazão contribuinte (q_6), pois não há contribuição pontual ($q_3 = 0,00 \text{ L/s}$). A vazão total recebida no elemento ($q_{11} = 321,78 \text{ L/s}$) é formada pela soma da vazão recebida na sub-bacia (q_8) e da vazão de montante ($q_{10} = 0,00 \text{ L/s}$), mostrando que não há esgoto vindo de outras sub-bacias. Do total recebido, $321,35 \text{ L/s}$ (q_{14}) são efetivamente conduzidos para jusante, enquanto apenas $0,43 \text{ L/s}$ (q_{12}) são perdidos no transporte, indicando eficiência no escoamento da vazão conduzida.

O esgoto não coletado (q_5), combinado à vazão não contribuinte (q_7), resulta em uma vazão lançada nos córregos ($q_9 = 279,06 \text{ L/s}$), que representa cerca de 55,1% do total gerado na sub-bacia. Essa vazão, somada às perdas não conduzidas ($q_{13} = 279,49 \text{ L/s}$), reflete o impacto ambiental significativo na BHRC e reforça a urgência de ampliar a infraestrutura de coleta e tratamento.

Os três últimos itens da Tabela 11 referem-se ao consumo micromedido de água, que oferece uma visão importante sobre a relação entre o consumo de água e a infraestrutura de coleta e tratamento de esgoto na região. O consumo micromedido de água TL 0 e TL 1 totaliza $2.401.168 \text{ m}^3/\text{mês}$, enquanto o consumo exclusivamente nas áreas TL 1 (áreas com rede coletora de esgoto) é de $1.602.088 \text{ m}^3/\text{mês}$, indicando que aproximadamente 66,8% do consumo total de água ocorre em áreas cobertas pela rede de esgoto.

Quando analisado o consumo micromedido de água dentro da cobertura de tratamento ($1.213.714 \text{ m}^3/\text{mês}$), observa-se que apenas cerca de 50,6% do total consumido na região é efetivamente direcionado para áreas que possuem infraestrutura completa de coleta e tratamento.

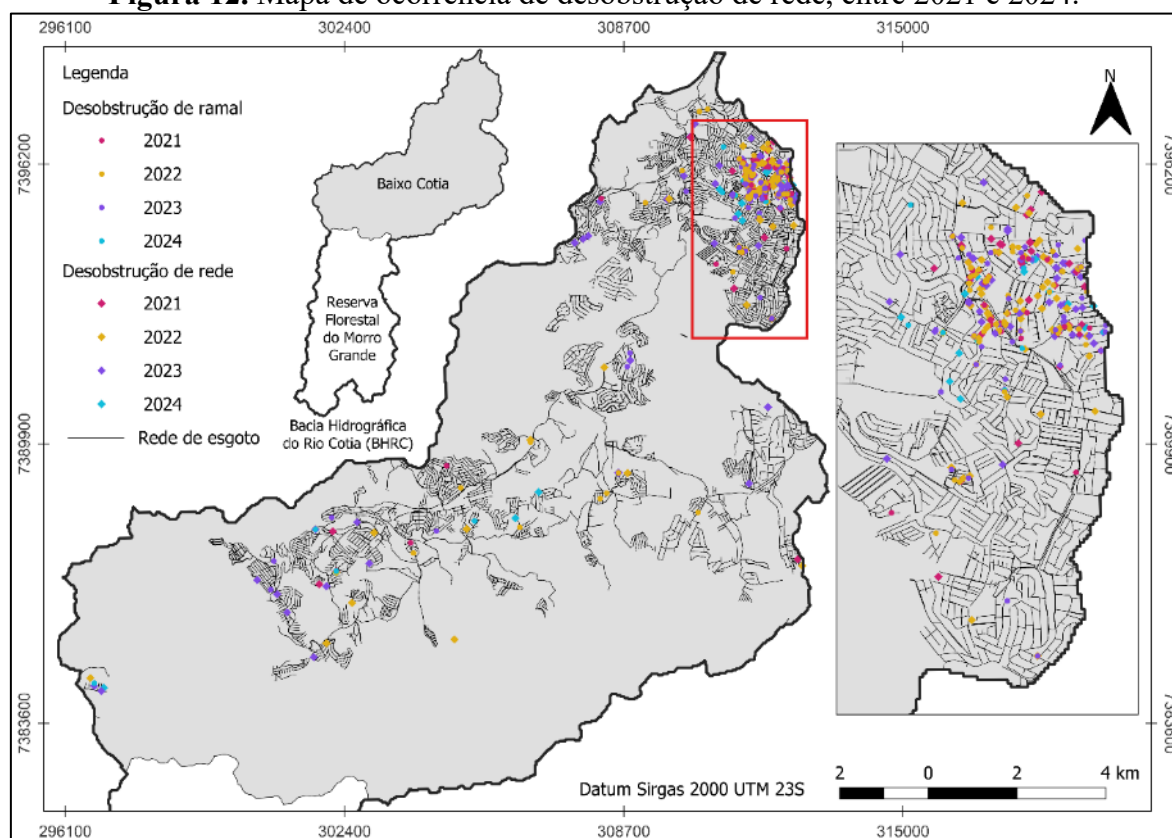
Esses dados refletem a necessidade de priorizar a expansão das redes de esgotamento sanitário, especialmente em áreas TL 0 (somente água), que representam cerca de 33,2% do consumo total e, em muitos casos, estão associadas a lançamentos de esgoto não tratado. A integração dessas áreas ao sistema é essencial para garantir que o aumento do consumo de

água, associado à urbanização, não resulte em impactos ambientais, como a poluição de corpos d'água por falta de tratamento adequado.

A ocorrência de vazão não contribuinte no sistema de esgotamento sanitário indica perdas significativas no transporte até as ETEs, comprometendo a eficiência do tratamento. Conforme Von Sperling (2016), em situações onde a ampliação das redes é inviável, pode-se adotar sistemas descentralizados, desde que haja viabilidade técnica e econômica. Entre as principais alternativas destacam-se fossas sépticas seguidas de filtros anaeróbios, reatores UASB, *wetlands* construídas e sistemas compactos com biofilmes ou lodos ativados. Essas soluções permitem tratar o esgoto próximo à fonte geradora, reduzindo impactos ambientais e garantindo maior cobertura em áreas periféricas ou rurais.

A Figura 12 apresenta um mapa de ocorrência de manutenções de desobstrução nas redes e ramais do SES da BHRC, classificadas por ano, de janeiro de 2021 a junho de 2024.

Figura 12. Mapa de ocorrência de desobstrução de rede, entre 2021 e 2024.



Fonte: Autoria própria.

Pela Figura 12, verifica-se que no período supracitado foram realizadas 251 desobstruções em ramais de esgoto e 343 desobstruções em redes coletoras, totalizando 594 ocorrências de manutenção. Nota-se também que cerca de 90% das iniciativas de ocorrências

partem dos clientes, assim como o tempo médio de reparo é de 24 a 48 horas, dependendo da complexidade da manutenção. Em função da prioridade de atendimento para desobstrução em redes coletoras, todas ocorrências foram classificadas como normais, já para desobstrução em ramais, 28% foram catalogadas como normais e 72% como urgentes.

Em relação a distribuição das ocorrências por ano na Figura 12, temos: para 2021, 40 desobstruções em ramais e 74 em redes coletoras; para 2022, 104 desobstruções em ramais e 128 em redes coletoras; para 2023, 86 desobstruções em ramais e 112 em redes coletoras; e finalmente até maio de 2024, 21 desobstruções em ramais e 29 desobstruções em redes coletoras.

A análise espacial da Figura 12 mostra que as ocorrências estão concentradas principalmente no nordeste da bacia, em função da densidade populacional e condições insuficientes do SES. A distribuição das ocorrências ao longo dos anos indica que tanto os ramais quanto as redes coletoras apresentam recorrência de obstruções, sendo que as redes coletoras, com 343 intervenções no período, representam 58% das ocorrências, enquanto os ramais, com 251 intervenções, correspondem a 42%.

Esses dados reforçam a necessidade de ações preventivas e estruturais nas áreas mais afetadas para reduzir a frequência das intervenções e minimizar os impactos operacionais e ambientais (ABRAHÃO, 2020).

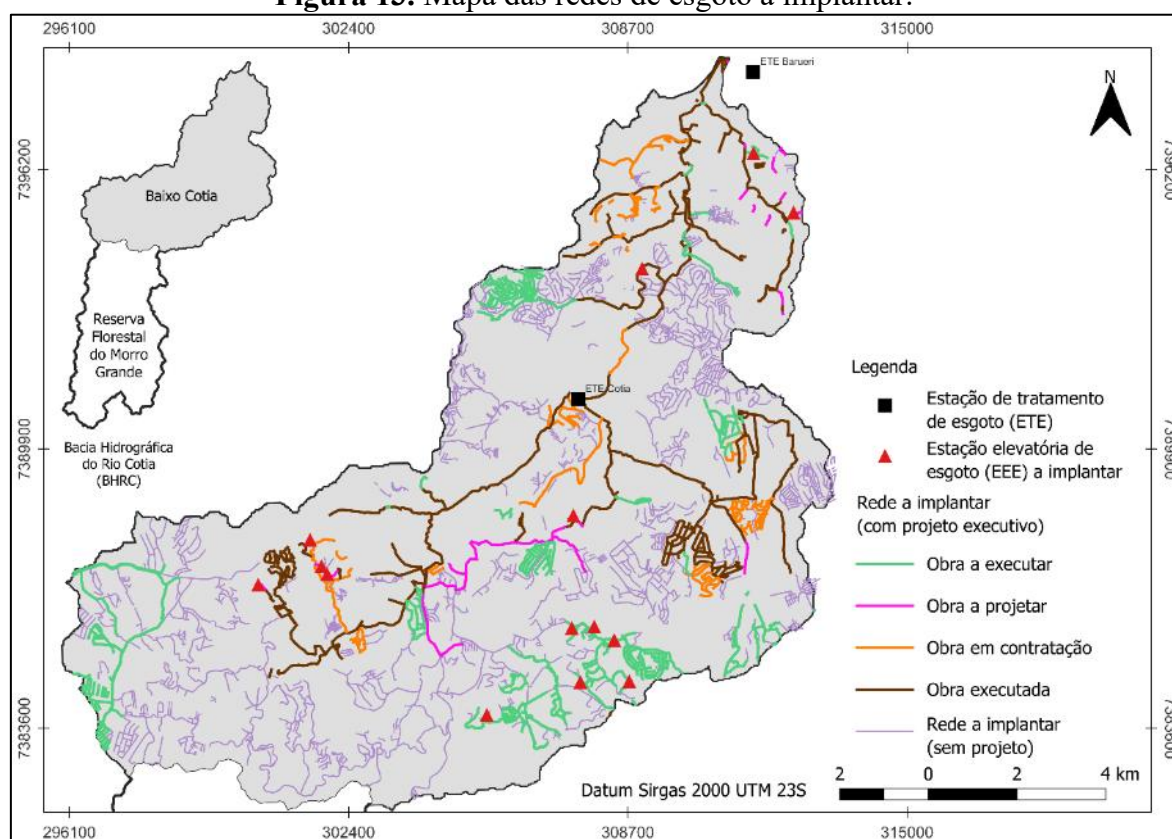
Os extravasamentos decorrem de insuficiência hidráulica, ligações clandestinas e afluições indevidas, expondo a população a esgoto bruto e elevando o risco sanitário; segundo Araujo et al. (2024), descargas em canais de drenagem causam impactos à saúde e à infraestrutura, e Paulo et al. (2022) recomendam adotar o *Sanitation Safety Planning* (OMS) para estruturar gestão de risco, monitoramento e respostas preventivas desde o projeto até a operação.

O dimensionamento das redes é, antes de tudo, uma decisão de saúde pública. Projetos calibrados apenas para o início do plano, complacentes com o adensamento e a verticalização e sem cenários de fim de plano ou integração com a drenagem, tornam previsíveis as sobrecargas, remansos e extravasamentos, com maior impacto nas periferias (OLIVEIRA, 2022).

Segundo Ito (2023), as otimizações orientadas a menor custo podem fixar traçados e diâmetros rígidos, insuficientes para absorver o crescimento de cargas. Em complemento, a falta de simulação conjunta de esgoto e águas pluviais amplifica refluxos e pontos críticos durante chuvas intensas. Essas escolhas técnicas produzem injustiça ambiental e elevam o risco de doenças de veiculação hídrica.

A Figura 13 apresenta a infraestrutura necessária para alcançar a universalização do saneamento na bacia, destacando a diferenciação entre redes já planejadas com projeto executivo e redes sugeridas, que ainda requerem elaboração de projetos.

Figura 13. Mapa das redes de esgoto a implantar.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 13 exhibe que as redes com projeto executivo estão classificadas em diferentes estágios: obras a executar (verde), obras em contratação (laranja) e obras já executadas (marrom). Essa categorização evidencia os esforços em andamento e as ações que precisam ser priorizadas para universalizar o SES. Por outro lado, as redes sem projeto estão representadas em roxo, indicando áreas onde ainda é necessário planejamento detalhado para viabilizar a implantação de infraestrutura de esgoto.

Verificando a Figura 13, nota-se que as redes a executar e em contratação estão predominantemente associadas a áreas urbanas já ocupadas, enquanto as redes sugeridas (sem projeto) tendem a estar em áreas de expansão ou transição, próximas a regiões rurais ou periferias urbanas. Essa distribuição reflete a necessidade de atender tanto às demandas atuais quanto às projeções futuras de ocupação.

A Figura 13 também destaca a relação entre as redes a implantar e a localização das ETEs e EEE's. As ETEs Barueri e Cotia, representadas em preto, são pontos centrais do sistema, responsáveis pelo tratamento do esgoto coletado. As EEE's a executar, representadas por triângulos pretos, indicam locais estratégicos para o bombeamento de esgotos em regiões onde a topografia não permite o transporte gravitacional, evidenciando a complexidade do sistema na BHRC.

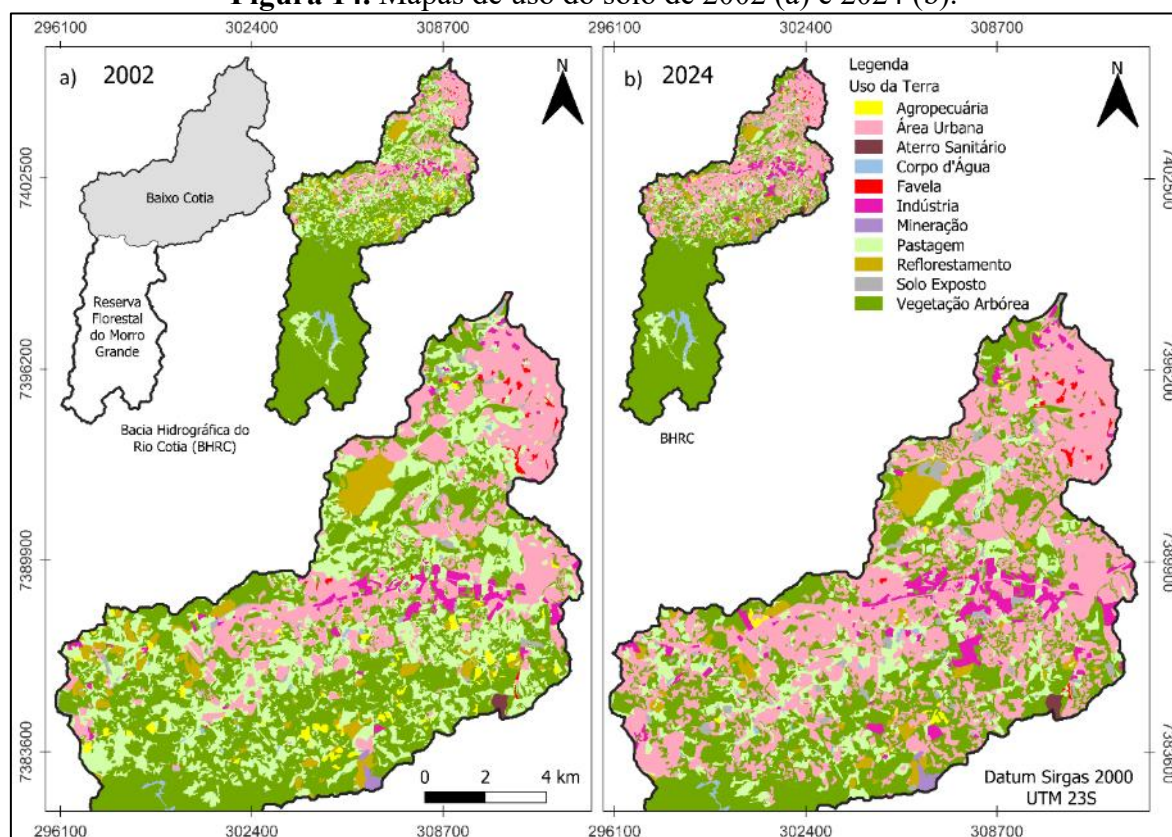
Destaca-se que as redes a projetar correspondem às redes sugeridas, delimitadas em áreas de expansão, e que ainda não possuem parâmetros técnicos definidos, como dimensionamento hidráulico, material, diâmetro e perfil longitudinal. As redes executadas, por sua vez, são tubulações já concluídas em termos de obra física, e que se encontram em operação. Já as redes com projeto a revisar são aquelas que necessitam de atualização no projeto executivo devido a alterações nas condições físicas, como mudanças no arruamento ou incremento no número de ligações previstas. Por fim, as redes em contratação referem-se às obras que estão em andamento até a data-base de junho de 2024.

Em relação à extensão das redes coletoras a implantar, temos: 442,20 km de redes a projetar; 97,39 km de redes executadas; 120,80 km de redes a executar; 16,21 km de redes a revisar o projeto executivo; e 36,40 km de redes em contratação.

Essa análise, baseada na Figura 13, demonstra a importância de integrar o planejamento de redes projetadas e sugeridas para atender à universalização. Além disso, ressalta a urgência de viabilizar projetos executivos para as redes sugeridas, garantindo que todas as áreas da bacia sejam contempladas com infraestrutura adequada. A priorização das obras de execução e contratação em áreas críticas, aliada à expansão planejada para regiões periféricas, é essencial para mitigar os lançamentos de esgoto não tratado e garantir a eficiência do SES. A relação entre as redes, ETEs e EEE's reforça a necessidade de um planejamento integrado e coordenado para alcançar a universalização de maneira sustentável.

A Figura 14 apresenta os mapas de uso do solo da BHRC para os anos de 2002 (14a) e 2024 (14b), evidenciando o aumento significativo da ocupação antrópica na bacia, especialmente devido à expansão das áreas urbanas (em vermelho), acompanhada por uma redução das áreas naturais, como vegetação arbórea (em verde escuro) e pastagens (em verde claro). Esse avanço urbano está diretamente relacionado à demanda crescente por infraestrutura de saneamento, como redes coletoras de esgoto, que também acompanharam essa transformação espacial ao longo do período (Adaptado de TONIOLO, 2020).

Figura 14. Mapas de uso do solo de 2002 (a) e 2024 (b).



Fonte: Autoria própria.

A análise da Figura 14a apresenta que em 2002 as áreas urbanas estavam concentradas em pontos específicos da bacia, com extensas áreas naturais predominando na porção norte e central. Nesse período, a necessidade de redes coletoras era mais limitada, atendendo principalmente as áreas urbanas consolidadas. Em contraste, a Figura 14b mostra em 2024 uma expansão urbana expressiva, com ocupação se expandindo em direção a áreas anteriormente caracterizadas por vegetação e pastagens, especialmente na porção sul e em torno de eixos viários. Essa expansão implica em um aumento significativo da necessidade de redes coletoras, uma vez que a urbanização não apenas aumenta a densidade habitacional,

mas também demanda infraestrutura para atender às novas áreas ocupadas (TONIOLO et al., 2024a).

A Tabela 12 apresenta a área em hectare de cada classe de uso do solo.

Tabela 12. Área e variação das classes de uso do solo de 2002 e 2024.

Classe de Solo	2002		2024		Variação (%)
	Área (he)	%	Área (he)	%	
Agropecuária	216,75	0,86	51,27	0,20	-76,35
Área Urbana	3.147,99	12,53	6.249,45	24,87	98,52
Aterro Sanitário	31,58	0,13	31,28	0,12	-0,95
Espelho de Água	287,21	1,14	385,62	1,53	34,26
Favela	60,89	0,24	57,77	0,23	-5,12
Indústria	371,42	1,48	680,72	2,71	83,28
Mineração	42,26	0,17	50,54	0,20	19,58
Pastagem	4.668,21	18,58	2.364,40	9,41	-49,35
Reflorestamento	687,31	2,74	471,73	1,88	-31,37
Solo Exposto	184,25	0,73	291,72	1,16	58,32
Vegetação Arbórea	15.429,03	61,40	14.492,41	57,68	-6,07
Total	25.126,90	100,00	25.126,90	100,00	-

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 12 aponta que a área urbana apresenta o crescimento mais significativo, passando de 12,53% da área total em 2002 para 24,87% em 2024, com um aumento de 98,52%. Esse avanço reflete o processo de urbanização acelerada e a conversão de áreas naturais e agrícolas para atender à expansão populacional e econômica. Por outro lado, as áreas de vegetação arbórea, que ainda representam a maior parcela do território, diminuíram em 6,07%, caindo de 61,40% para 57,68%, evidenciando a pressão antrópica sobre os recursos naturais.

Verifica-se, na Tabela 12, que as áreas de pastagem também sofreram uma redução acentuada, com queda de 49,35%, passando de 18,58% para 9,41%, indicando que terras tradicionalmente usadas para pecuária foram substituídas por áreas urbanas ou industriais. A indústria apresenta um aumento expressivo de 83,28%, com sua participação crescendo de 1,48% para 2,71%, alinhada ao desenvolvimento econômico da bacia. As áreas de solo exposto aumentaram 58,32%, refletindo locais em transição, como áreas de obras, expansão urbana ou atividades de mineração.

Ainda observando a Tabela 12, nota-se que as áreas de agropecuária tiveram uma redução de 76,35%, representando apenas 0,20% do território em 2024, sugerindo um

declínio acentuado da atividade agrícola em favor de usos mais urbanos ou industriais. Por outro lado, o espelho d'água aumentou em 34,26%, indicando a criação de novos reservatórios ou canalização dos corpos d'água existentes, enquanto o reflorestamento caiu 31,37%, mostrando uma redução nos esforços de recuperação de áreas degradadas. As áreas de favela, apesar de sua pequena proporção, apresentaram uma leve redução de 5,12%, enquanto as áreas de mineração cresceram 19,58%, refletindo a intensificação da exploração de recursos naturais.

A Figura 14 e a Tabela 12 evidenciam que essas transformações no uso do solo têm implicações diretas na infraestrutura de saneamento, particularmente na necessidade de redes coletoras. O crescimento das áreas urbanas e industriais aumenta significativamente a demanda por redes de coleta de esgoto, especialmente em regiões anteriormente ocupadas por pastagens ou vegetação arbórea. A expansão do solo exposto, frequentemente associada a áreas em urbanização ou obras de empreendimentos imobiliários, também sugere um aumento na necessidade de planejamento para integrar essas novas áreas ao sistema de saneamento (DIB et al., 2022).

Em contrapartida, a diminuição das áreas de agropecuária e pastagem pode reduzir a pressão sobre regiões menos urbanizadas, permitindo concentrar investimentos em zonas de maior densidade habitacional. No entanto, a redução das áreas de vegetação arbórea e de reflorestamento destaca a importância de um planejamento integrado que considere não apenas a expansão das redes coletoras, mas também a preservação dos recursos naturais e a mitigação dos impactos ambientais do crescimento urbano na BHRC (AREAL, 2023).

Nas áreas rurais e industriais, a descentralização do tratamento se torna uma alternativa relevante diante das limitações de expansão do sistema coletivo, por meio de soluções como mini ETEs, fossas sépticas avançadas e sistemas compactos. Além disso, o crescimento de condomínios de alto padrão, que frequentemente adotam sistemas próprios de tratamento, reforça a presença desses arranjos descentralizados no território. Embora não incorporadas à modelagem desta tese, essas soluções influenciam a dinâmica da universalização e reduzem a pressão sobre o sistema centralizado, especialmente em regiões onde a expansão da rede pública é menos viável (GHOSH et al., 2023).

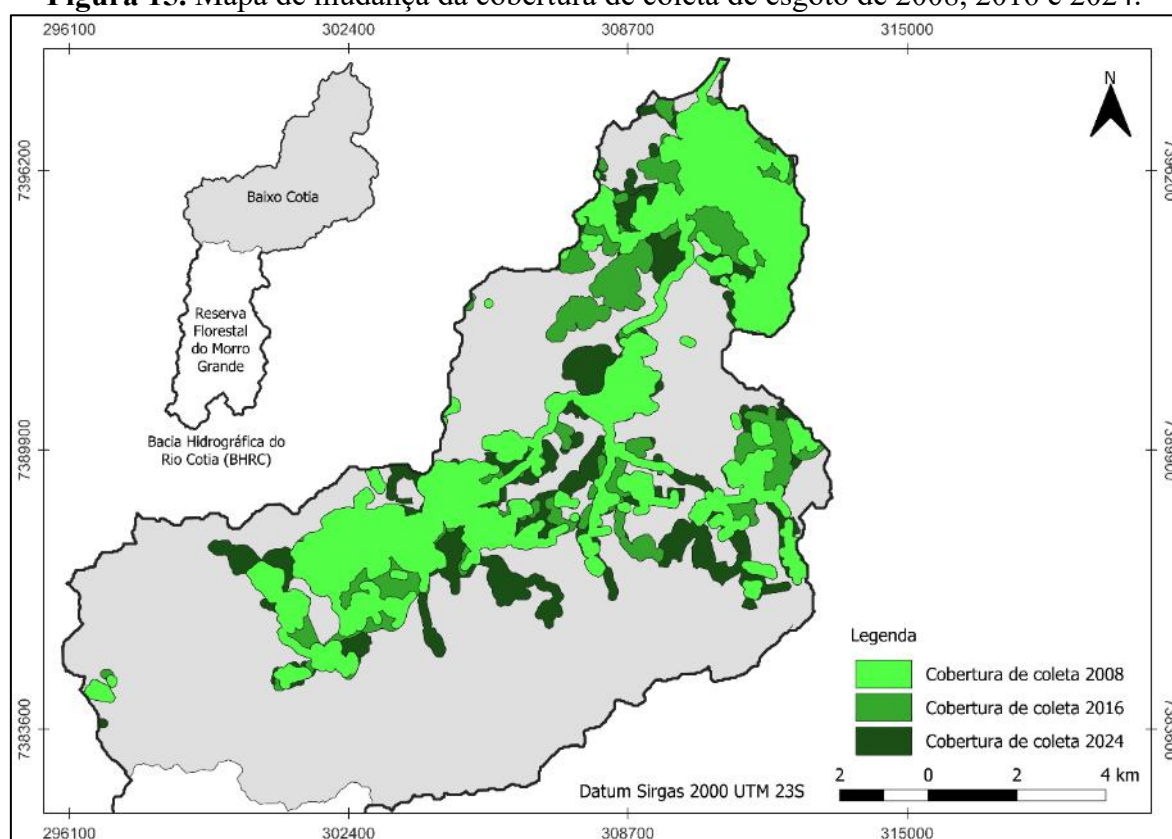
Na BHRC existem 50 favelas (IBGE, 2024); dessas, 33 contam com coleta e tratamento, 44 apenas coleta e 17 não possuem nenhuma das duas coberturas. Essa

parcialidade de atendimento revela um padrão de distribuição desigual de riscos e benefícios ambientais — típico do racismo ambiental: de acordo com Santos e Moraes (2022), bairros de maioria negra têm pior acesso a água e esgoto; conforme Rossi (2024), a desigualdade espacial do saneamento persiste nas periferias das metrópoles, reforçando a necessidade de políticas inclusivas e investimentos estruturantes focalizados em áreas vulneráveis.

7.3 EVOLUÇÃO DA COBERTURA

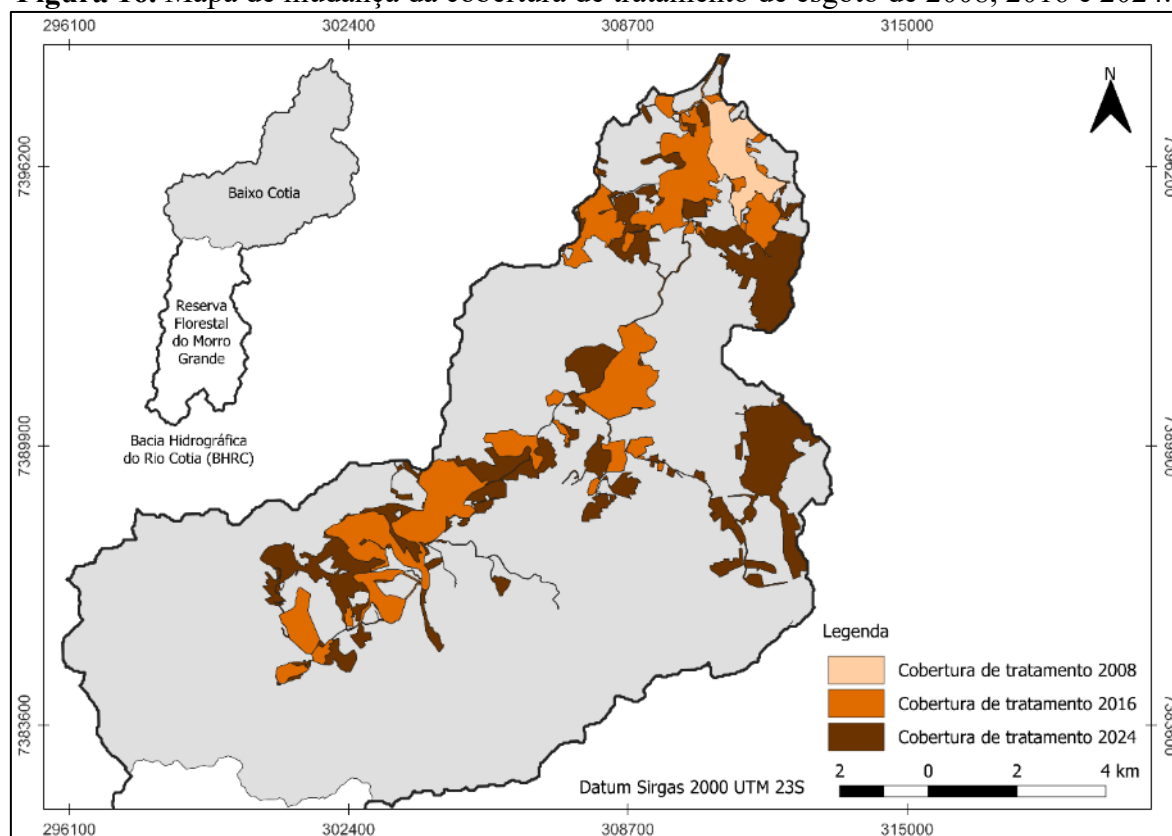
As Figuras 15 e 16 apresentam os mapas de expansão da cobertura de coleta e tratamento de esgoto para os anos de 2008, 2016 e 2024, respectivamente.

Figura 15. Mapa de mudança da cobertura de coleta de esgoto de 2008, 2016 e 2024.



Fonte: Autoria própria.

Figura 16. Mapa de mudança da cobertura de tratamento de esgoto de 2008, 2016 e 2024.



Fonte: Autoria própria.

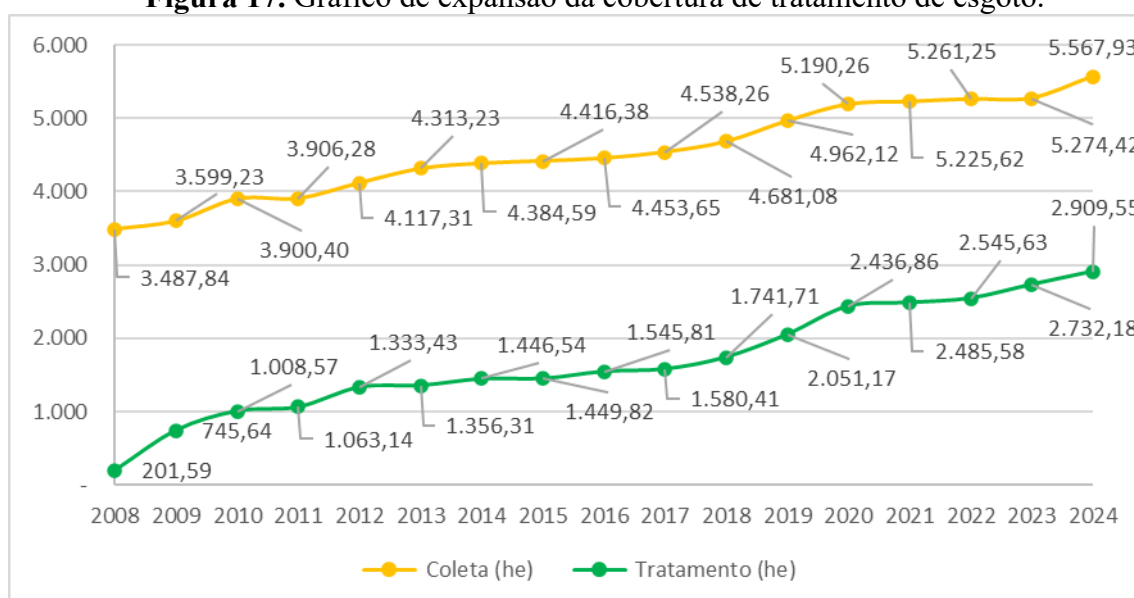
As Figuras 15 e 16 apresentam uma relação dinâmica entre coleta e tratamento: enquanto a coleta cresceu de forma constante, o tratamento exigiu períodos de crescimento acelerados para tentar acompanhar a expansão da coleta. Essa redução na proporção entre coleta e tratamento é indicativo de avanços em direção à universalização do saneamento, mas ressalta a necessidade de manter o foco na expansão do tratamento para estruturar um sistema equilibrado, onde todo o esgoto coletado seja devidamente tratado a fim de reduzir o descompasso entre as coberturas de coleta e tratamento de esgoto na BHRC.

A Figura 15 evidencia a expansão planejada da infraestrutura de coleta na BHRC entre 2008 e 2024, marcada por avanços significativos na conectividade, contiguidade e eficiência da rede. Inicialmente fragmentada e irregular em 2008, a cobertura evoluiu para polígonos mais compactos, conectados e geométricos em 2024, indicando superação de barreiras urbanas e topográficas. O crescimento orientado pelos pontos cardeais expandiu de áreas prioritárias nos quadrantes leste e sul até 2016 para inclusão de regiões periféricas ao norte e oeste até 2024. A ampliação do tamanho médio dos polígonos e a redução de vazios reforçam a consolidação do SES.

A Figura 16 destaca o desenvolvimento da cobertura de tratamento de esgoto na BHRC entre 2008 e 2024, evidenciando uma evolução de um sistema fragmentado e restrito para uma rede ampla e quase totalmente conectada. Em 2008, as coberturas de tratamento eram limitadas e isoladas, refletindo uma infraestrutura inicial focada em regiões próximas às ETEs. Em 2016, a expansão ganhou contiguidade e compactação, principalmente nos quadrantes sul e leste, acompanhando a demanda crescente nessas regiões. Em 2024, a rede de tratamento se apresenta consolidada, com grandes blocos integrados cobrindo boa parte da bacia e expansão para áreas periféricas ao norte e oeste.

A Figura 17 apresenta um gráfico da evolução das coberturas de coleta e tratamento de esgoto (em hectares) na BHRC entre os anos de 2008 e 2024.

Figura 17. Gráfico de expansão da cobertura de tratamento de esgoto.



Fonte: Autoria própria.

Pela Figura 17, verifica-se uma análise comparativa das coberturas de coleta e tratamento de esgoto na BHRC entre 2008 e 2024, a evidenciar um progresso significativo na redução da disparidade entre os dois serviços, embora a coleta permaneça maior do que o tratamento. Em 2008, a cobertura de coleta (3.487,84 hectares) era cerca de 17 vezes maior que a de tratamento (201,59 hectares), indicando uma infraestrutura insuficiente para processar o esgoto coletado e potenciais impactos ambientais. Ao longo do período, o crescimento na cobertura de tratamento foi substancial, especialmente até 2012, quando a diferença caiu para cerca de 3 vezes, e até maio de 2024, com a cobertura de coleta alcançando 5.567,93 hectares e a de tratamento 2.909,55 hectares, equivalente a uma

proporção de 1,9 vezes. Esses avanços refletem esforços para alinhar as duas infraestruturas, mas ainda apontam desafios significativos.

A Tabela 13 apresenta a contagem de ligações TL Sabesp dentro e fora da cobertura da coleta e tratamento.

Tabela 13. Contagem de ligações nas coberturas.

Ano	Cobertura de Coleta			Cobertura de Tratamento		
	Dentro	Fora	Total	Dentro	Fora	Total
2008	8.648	3.781	12.429	1.108	10.770	11.878
2009	11.892	4.436	16.328	4.903	11.976	16.879
2010	14.199	5.187	19.386	3.840	15.546	19.386
2011	17.878	6.017	23.895	5.225	18.670	23.895
2012	22.843	6.806	29.649	7.837	27.521	35.358
2013	30.231	7.687	37.918	10.397	29.649	40.046
2014	36.285	8.568	44.853	14.343	30.510	44.853
2015	44.782	10.690	55.472	17.635	37.837	55.472
2016	53.224	11.859	65.083	22.799	42.284	65.083
2017	61.929	12.868	74.797	26.565	48.232	74.797
2018	73.607	14.236	87.843	35.371	52.472	87.843
2019	97.064	15.788	112.852	50.235	62.617	112.852
2020	117.451	16.873	134.324	67.763	66.561	134.324
2021	125.692	17.584	143.276	71.383	71.893	143.276
2022	127.191	17.965	145.156	72.723	72.433	145.156
2023	129.087	18.176	147.263	79.353	60.953	140.306
2024	132.237	18.865	151.102	86.688	67.910	154.598

Fonte: Autoria própria.

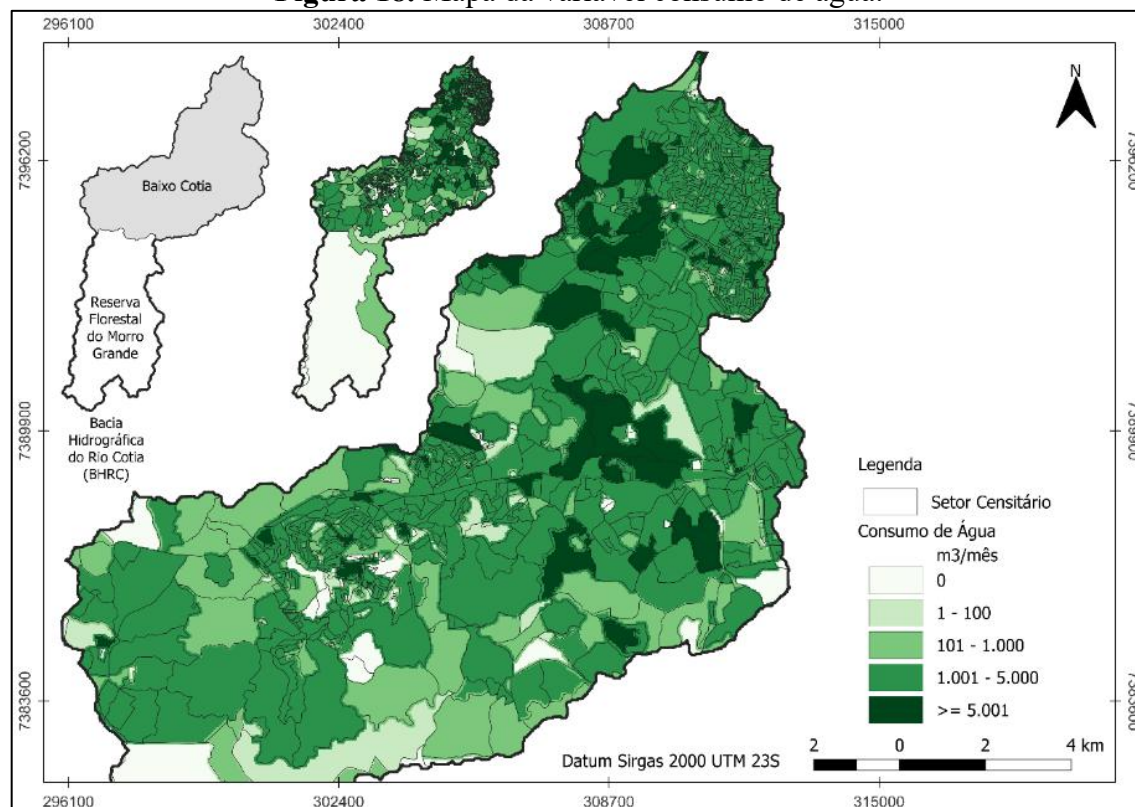
A Tabela 13 demonstra um progresso contínuo na expansão das coberturas de coleta e tratamento de esgoto na BHRC, com um aumento significativo na cobertura, especialmente nas coberturas de coleta. A crescente concentração de ligações nas áreas cobertas ao longo dos anos reflete avanços na cobertura de saneamento, embora ainda seja necessário priorizar investimentos na infraestrutura de afastamento, isto é, coletores tronco e interceptores. Esse foco é essencial para garantir que o esgoto coletado seja adequadamente tratado, minimizando impactos ambientais e contribuindo para alcançar a universalização do saneamento na BHRC (SABESP, 2025).

7.4 ANÁLISE DAS VARIÁVEIS EXPLANATÓRIAS

A variável consumo de água (Figura 18) influencia diretamente a geração de esgoto, determinando a vazão de esgoto que precisa ser coletada e tratada no SES. Áreas com maior consumo indicam maior produção de efluente, o que exige uma infraestrutura adequada de

coleta e transporte para as ETEs. Além disso, o consumo elevado pode sinalizar regiões prioritárias para expansão da rede coletora e tratamento, auxiliando no planejamento de obras e no dimensionamento do SES para atender à demanda crescente de forma eficiente e sustentável.

Figura 18. Mapa da variável consumo de água.



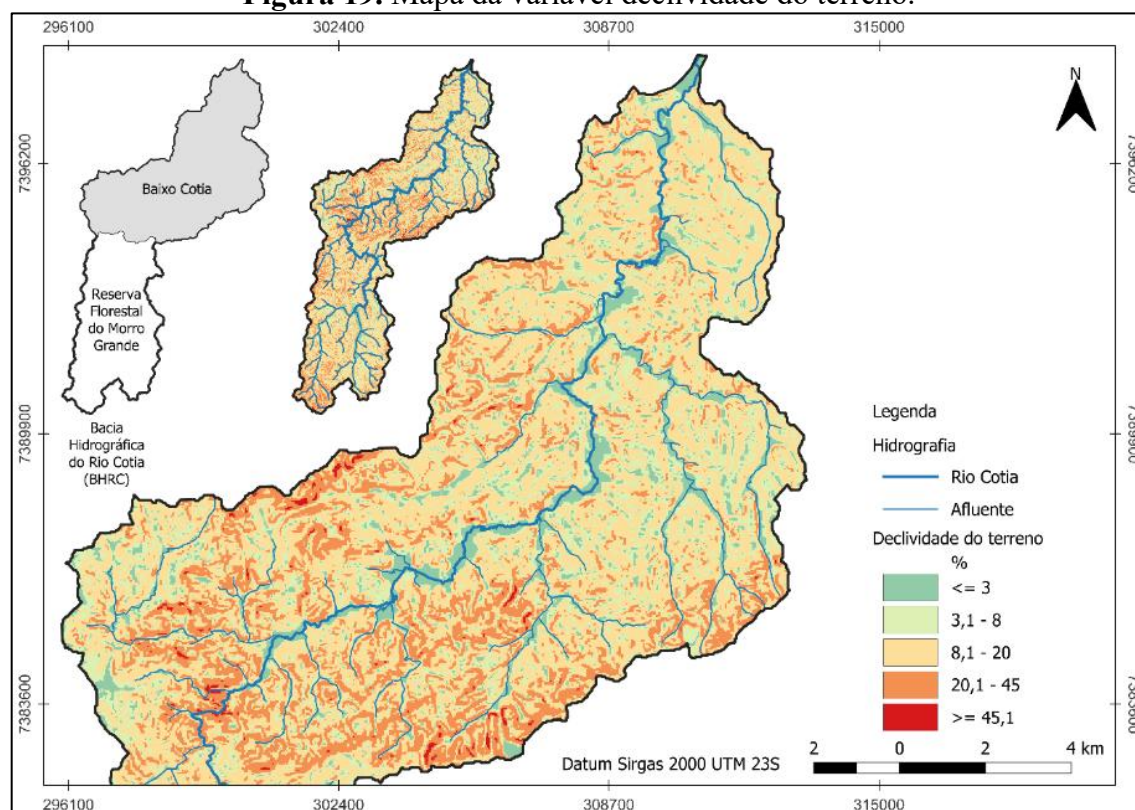
Fonte: Autoria própria.

A Figura 18 evidencia maiores volumes de consumo de água nas áreas urbanizadas, onde há maior densidade populacional e infraestrutura consolidada, enquanto as regiões periféricas exibem menor consumo. Esse padrão reflete diretamente na geração de esgoto e na pressão sobre o SES, indicando áreas prioritárias para manutenção e renovação das redes coletoras. A análise espacial dessa variável é crucial para orientar o planejamento, priorizando intervenções em áreas de alta demanda e mitigando possíveis impactos ambientais decorrentes do descarte inadequado de esgoto.

A variável declividade do terreno (Figura 19) é fundamental no planejamento do SES, pois influencia no custo e na viabilidade técnica da instalação de redes coletoras. Terrenos com declividade moderada facilitam a condução gravitacional do esgoto, reduzindo custos operacionais, enquanto declividades excessivas podem demandar soluções específicas, como implantação de estações elevatórias. Além disso, a análise da declividade ajuda a

identificar áreas mais propícias para expansão do SES, garantindo eficiência e sustentabilidade na operação do sistema.

Figura 19. Mapa da variável declividade do terreno.



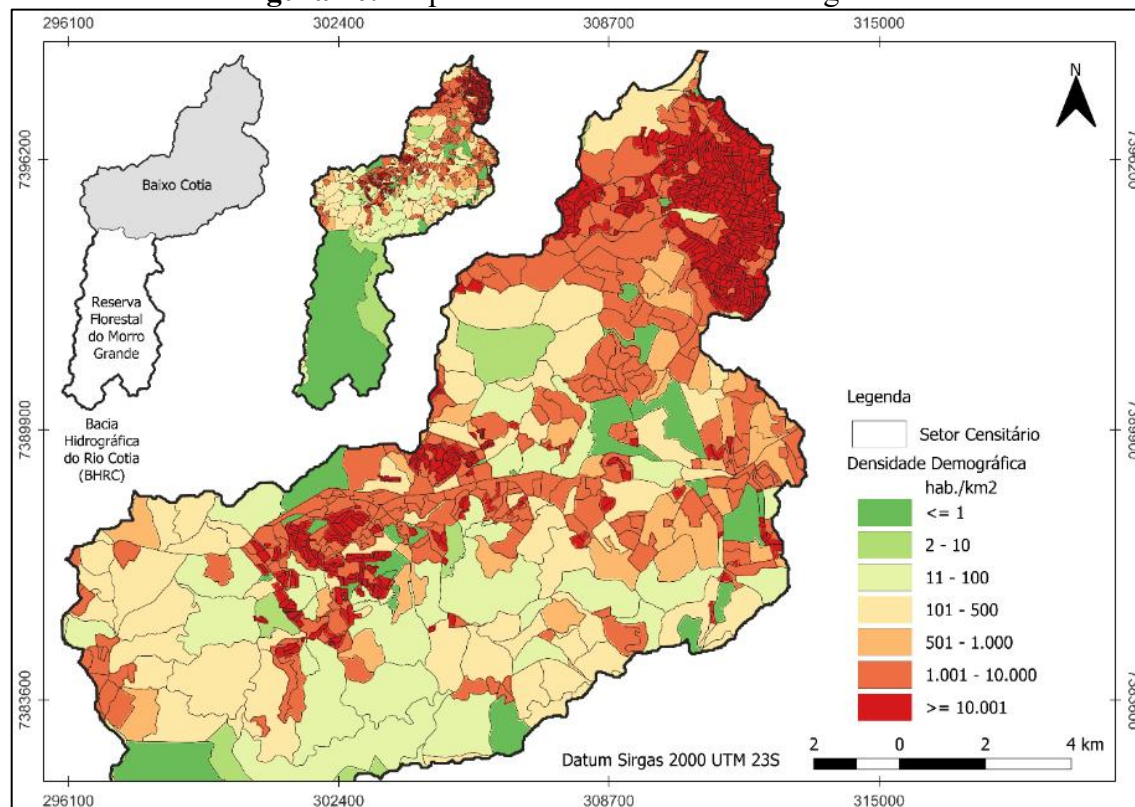
Fonte: Autoria própria.

A Figura 19 evidencia que a BHRC possui predominância de áreas com declividades suaves a moderadas ($\leq 20\%$), especialmente nas regiões centrais e ao longo dos cursos d'água, favorecendo a implantação de redes coletoras de esgoto. Já as áreas com declividades mais acentuadas ($20 - 45\%$ e $> 45\%$), representadas em tons avermelhados, concentram-se nas bordas e em zonas de cabeceira, dificultando a infraestrutura sanitária devido ao maior custo operacional e risco de erosão. Essas regiões requerem planejamento técnico específico, como o uso de sistemas pressurizados ou estações elevatórias para garantir o transporte do esgoto no SES. A análise da declividade é fundamental para identificar os desafios topográficos na expansão das redes, priorizar intervenções em terrenos mais favoráveis.

A variável densidade demográfica (Figura 20) foi selecionada por refletir a distribuição da população na BHRC, sendo fundamental para estimar a demanda por serviços de esgotamento sanitário. Regiões com maior densidade tendem a gerar volumes mais significativos de esgoto, exigindo infraestrutura robusta e investimentos prioritários para atender a demanda. Por outro lado, áreas com menor densidade apresentam desafios de

viabilidade técnica e econômica para expansão do sistema. Dessa forma, essa variável permite direcionar o planejamento e as intervenções, garantindo eficiência no processo de universalização do saneamento.

Figura 20. Mapa da variável densidade demográfica.

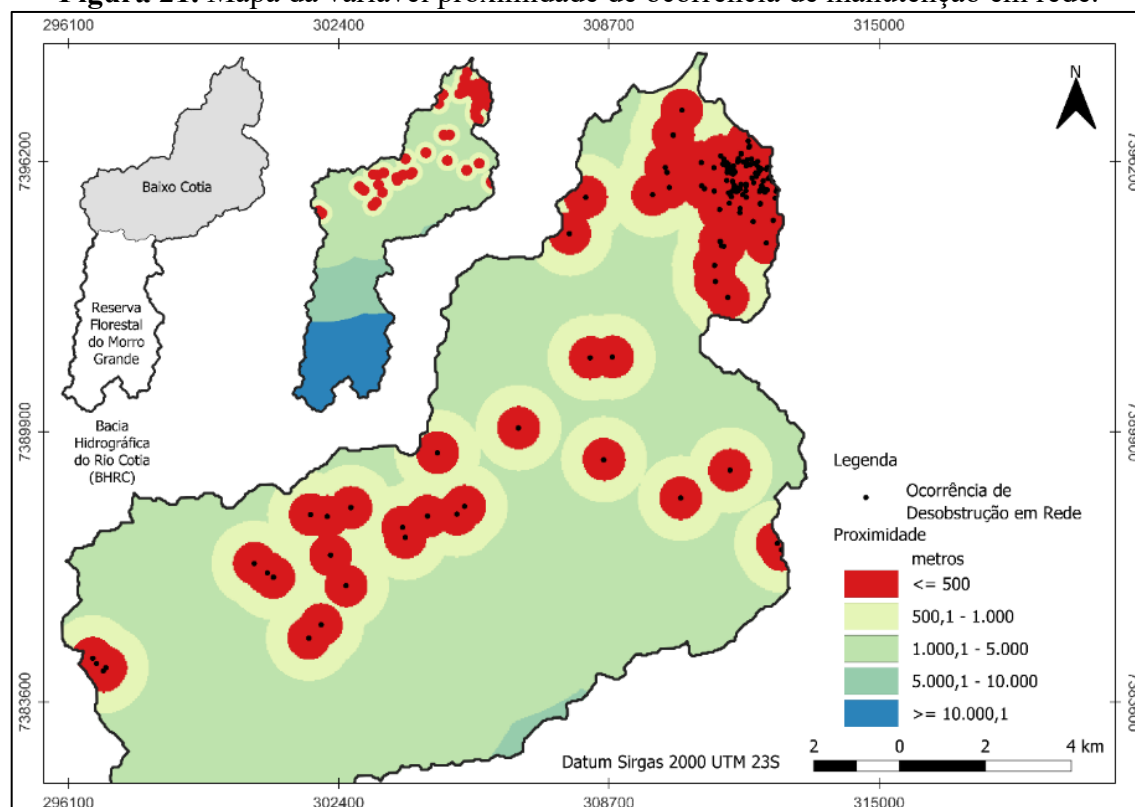


Fonte: Autoria própria.

A Figura 20 destaca a densidade demográfica da BHRC, com maior adensamento no extremo norte e núcleos isolados no sudoeste (>10.000 hab./km²), enquanto áreas periféricas e a Reserva Florestal do Morro Grande possuem baixa densidade. Essa variação é fundamental para o planejamento operacional do SES, pois regiões densas exigem infraestrutura robusta, enquanto áreas menos povoadas enfrentam desafios de viabilidade econômica, orientando a priorização de ações para a universalização do saneamento.

A variável proximidade de ocorrência de manutenção em rede (Figura 21) foi escolhida por indicar áreas com maior incidência de falhas na rede coletora, como vazamentos, obstruções e interrupções. Essas ocorrências podem aumentar o risco de lançamentos de esgoto não tratado, afetando a qualidade dos corpos hídricos e demandando reforços na infraestrutura do SES.

Figura 21. Mapa da variável proximidade de ocorrência de manutenção em rede.



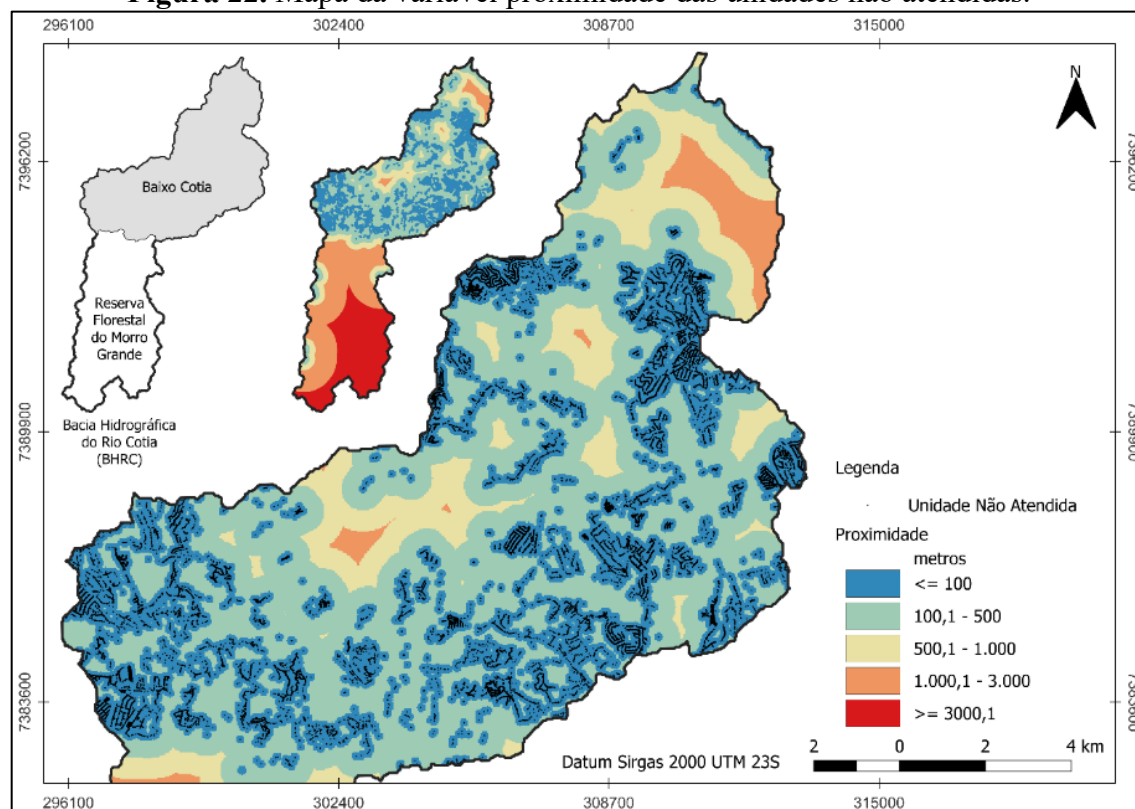
Fonte: Autoria própria.

A Figura 21 apresenta a proximidade das ocorrências de desobstrução na rede de esgoto, destacando áreas críticas com distâncias inferiores a 500 metros, representadas em vermelho, concentradas no norte e sudoeste da bacia. Esses locais coincidem com regiões mais urbanizadas, sugerindo uma sobrecarga da infraestrutura devido à alta densidade populacional. As zonas com proximidade entre 500 e 1.000 metros, em tons amarelos, indicam áreas de risco moderado, enquanto as regiões mais afastadas (verde e azul) representam áreas menos suscetíveis a manutenções frequentes. A análise reforça a necessidade de priorizar investimentos em manutenção e modernização da rede nas áreas críticas, visando garantir a eficiência do SES e reduzir impactos ambientais decorrentes de falhas no sistema.

A variável proximidade de unidades não atendidas (Figura 22) foi escolhida por representar a lacuna existente na cobertura do SES, indicando regiões prioritárias para a expansão da infraestrutura. As unidades não atendidas são derivadas de duas fontes de dados distintas: os imóveis conectados somente à rede de água (TL 0 – Sabesp) e os domicílios particulares fora da cobertura do SES, conforme o IBGE (2022). Essa variável é essencial para identificar áreas com demanda reprimida, permitindo um planejamento mais eficiente das ações de universalização. A proximidade dessas unidades reflete a concentração espacial

de domicílios sem acesso ao esgotamento sanitário, fornecendo subsídios para a priorização de investimentos e obras necessárias, além de auxiliar na análise do impacto da expansão da rede em termos sociais, ambientais e econômicos.

Figura 22. Mapa da variável proximidade das unidades não atendidas.



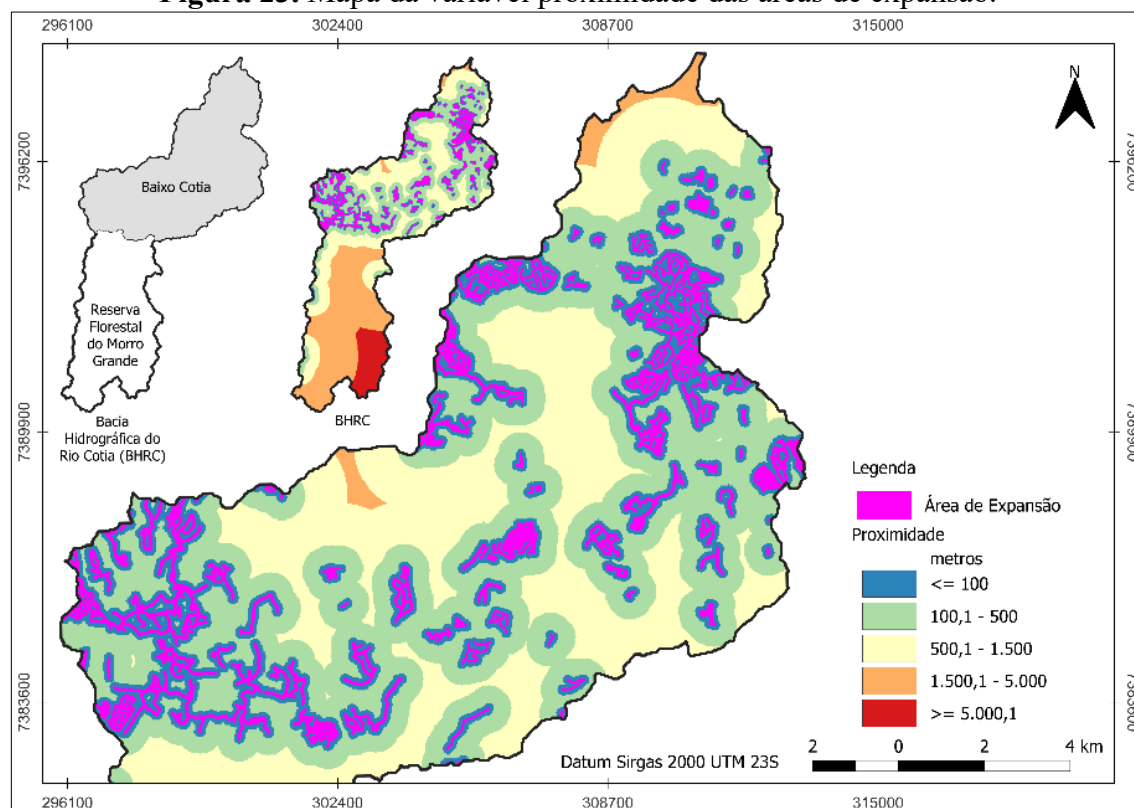
Fonte: Autoria própria.

A Figura 22 evidencia maior concentração de unidades não atendidas no centro-sul e no extremo norte, representadas em tons vermelhos e laranja, que indicam distâncias superiores a 1000 metros das redes existentes. Essas áreas sinalizam prioridade na expansão do SES devido ao déficit significativo de atendimento. Em contraste, as regiões em tons azuis, predominantemente no oeste e leste da bacia, indicam unidades mais próximas às redes existentes, com distâncias inferiores a 500 metros, facilitando a implementação de novas conexões.

A variável proximidade de áreas de expansão (Figura 23) foi selecionada por identificar as regiões prioritárias para a implantação de redes coletoras de esgoto, de acordo com o planejamento técnico da Sabesp (2024c). Essas áreas já contam com projetos executivos elaborados. Do ponto de vista ambiental, a rápida execução dessas obras contribui para a redução dos lançamentos de esgoto não tratado nos corpos hídricos, mitigando impactos como a contaminação da água e a degradação dos ecossistemas locais.

Assim, a proximidade a essas áreas reflete um fator determinante para priorizar investimentos, otimizando a expansão do SES de forma eficiente e sustentável.

Figura 23. Mapa da variável proximidade das áreas de expansão.



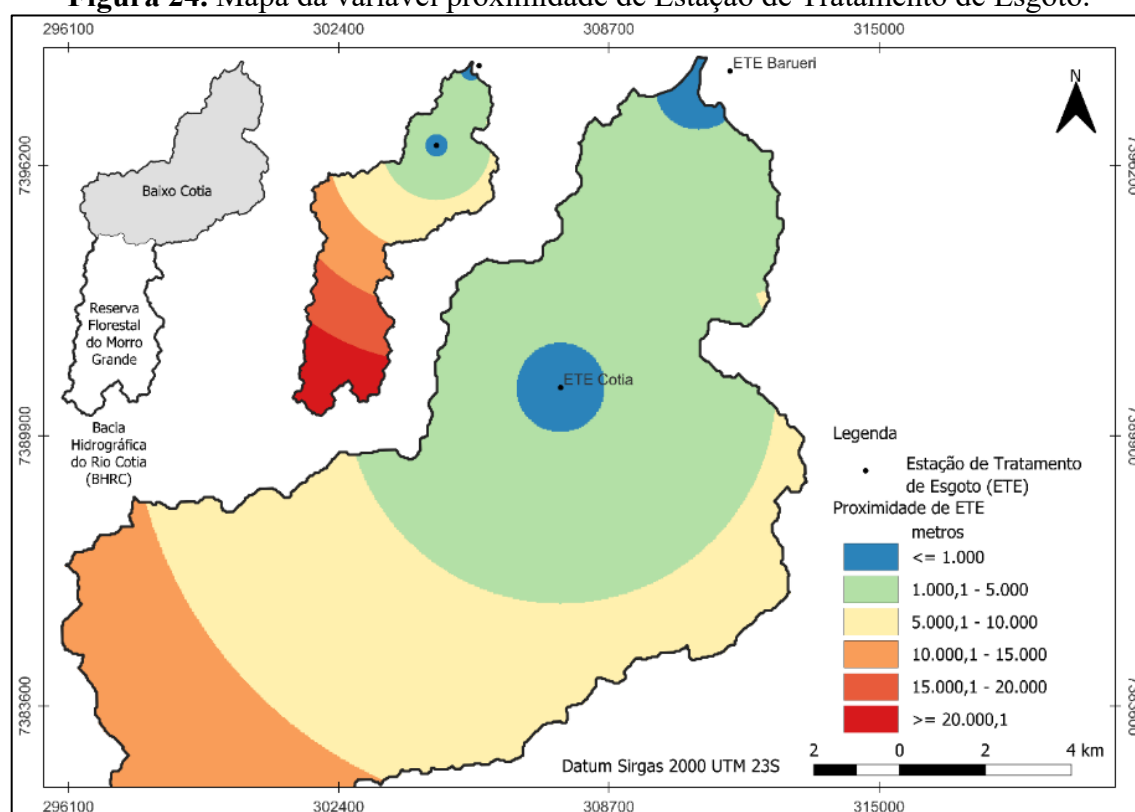
Fonte: Autoria própria.

A Figura 23 evidencia que as zonas em azul (≤ 100 metros) representam os locais mais próximos às áreas de expansão previamente definidas no planejamento técnico da Sabesp (2024c), enquanto as áreas em tons de verde e amarelo (100 a 1.500 metros) indicam distâncias intermediárias dessas áreas de expansão. Já as regiões em laranja e vermelho (> 1.500 metros) correspondem a setores mais afastados do núcleo de expansão urbana. A distribuição espacial revela uma maior concentração das áreas de expansão nas porções sudoeste e central da bacia, o que está em consonância com as diretrizes territoriais do plano diretor para densificação em zonas estruturadas.

Essa proximidade favorece o planejamento SES, pois permite que as intervenções de saneamento sejam mais bem articuladas ao uso do solo definido pela política urbana — otimizando recursos, facilitando a conexão de domicílios ainda não cobertos, reduzindo lançamentos de esgoto não tratado e, assim, dando suporte à meta de universalização do saneamento básico contemplada em planos municipais de saneamento.

A variável proximidade de estação de tratamento de esgoto (ETE) (Figura 24) foi escolhida por influenciar a eficiência e viabilidade econômica da expansão das redes de esgoto. Áreas próximas a uma ETE têm menores custos de transporte e instalação de tubulações. Ambientalmente, essa proximidade reduz o risco de vazamentos e contaminação do solo e da água, além de facilitar a manutenção e monitoramento do sistema, garantindo um tratamento mais eficiente do esgoto e preservando a qualidade ambiental e a saúde pública.

Figura 24. Mapa da variável proximidade de Estação de Tratamento de Esgoto.



Fonte: Autoria própria.

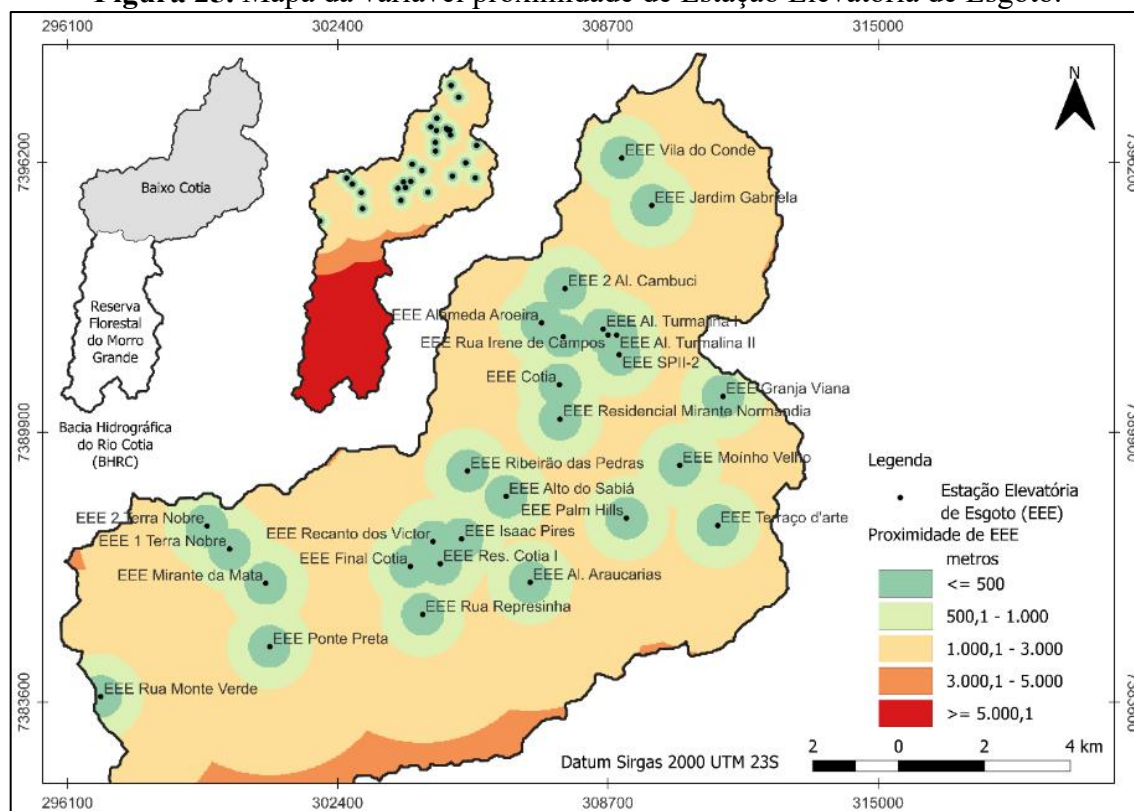
A Figura 24 mostra a proximidade das áreas em relação às ETEs Cotia e Barueri, destacando que as regiões centrais, próximas às estações (até 5.000 metros), possuem maior facilidade de conexão com a infraestrutura existente.

Já as áreas periféricas, especialmente no sudoeste e norte da bacia, apresentam maiores distâncias (> 15.000 metros), exigindo investimentos em redes coletoras e troncos coletores para garantir o transporte eficiente do esgoto e reduzir lançamentos de esgoto não tratado.

A variável proximidade de estação elevatória de esgoto (EEE) (Figura 25) influencia a eficiência operacional das redes de esgoto. Áreas próximas a uma EEE são priorizadas

porque essas estações ajudam a bombear o esgoto para locais mais elevados ou distantes, facilitando o fluxo e reduzindo custos de infraestrutura. Ambientalmente, a proximidade de uma EEE minimiza o risco de vazamentos e contaminação, além de garantir um transporte mais eficiente dos efluentes, contribuindo para a preservação da qualidade ambiental e da saúde pública.

Figura 25. Mapa da variável proximidade de Estação Elevatória de Esgoto.



Fonte: Autoria própria.

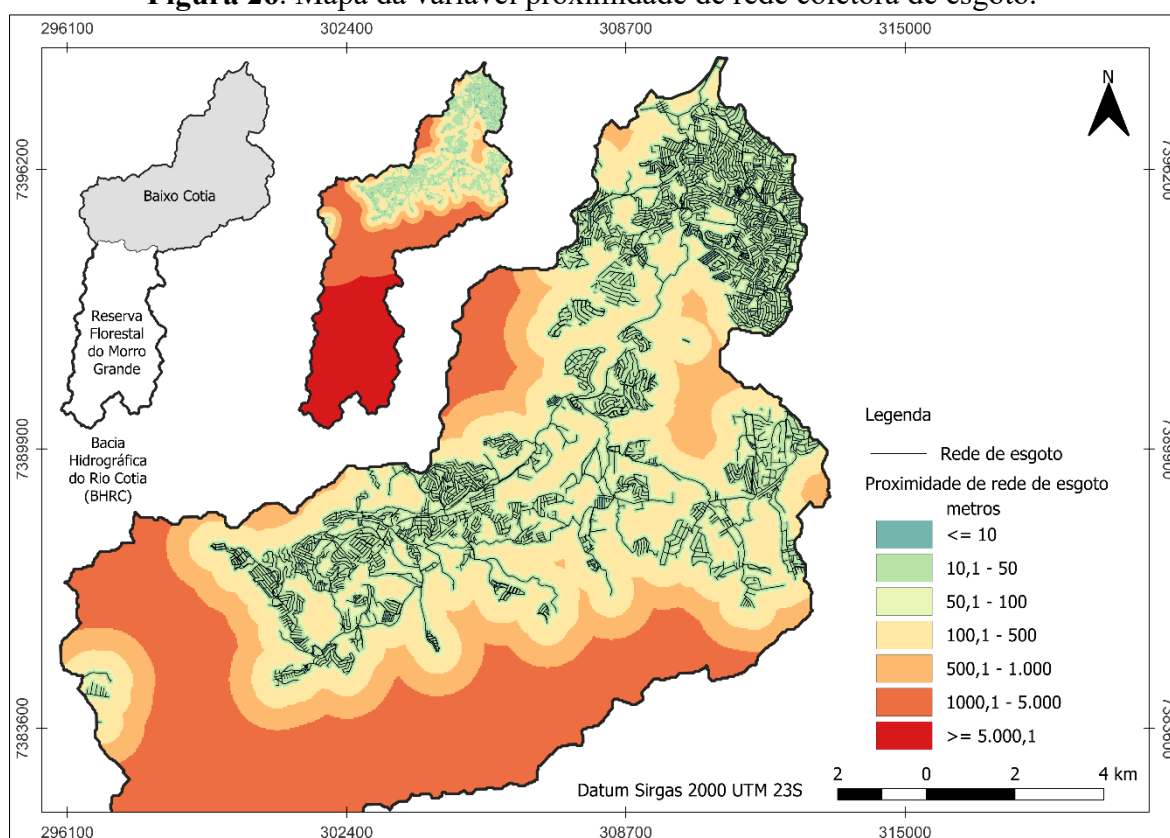
A Figura 25 apresenta a proximidade das áreas em relação às Estações Elevatórias de Esgoto (EEE), com destaque para as regiões em tons de verde (< 1.000 metros), que se encontram mais próximas à infraestrutura de bombeamento. Essas áreas, principalmente no centro e sul da bacia, são mais beneficiadas pela cobertura, pois possuem melhor conectividade com o sistema existente. Já as regiões em tons de laranja e vermelho (> 3.000 metros) indicam áreas mais afastadas das EEE, especialmente no sudoeste e extremo norte da bacia, exigindo investimentos adicionais para viabilizar o transporte do esgoto até as estações de tratamento. O mapa ressalta a importância estratégica das EEE para superar limitações topográficas e garantir a eficiência do sistema de esgotamento sanitário na BHRC.

A variável proximidade de rede coletora de esgoto (Figura 26) influencia diretamente a expansão da cobertura de esgotamento sanitário. Esta variável é crucial, pois áreas

próximas a essas redes são priorizadas devido à facilidade de conexão e menor custo de infraestrutura.

Do ponto de vista ambiental, a proximidade de uma rede coletora de esgoto reduz o risco de vazamentos e contaminação do solo e da água, além de garantir um transporte mais eficiente dos efluentes, contribuindo significativamente para a preservação da qualidade ambiental.

Figura 26. Mapa da variável proximidade de rede coletora de esgoto.



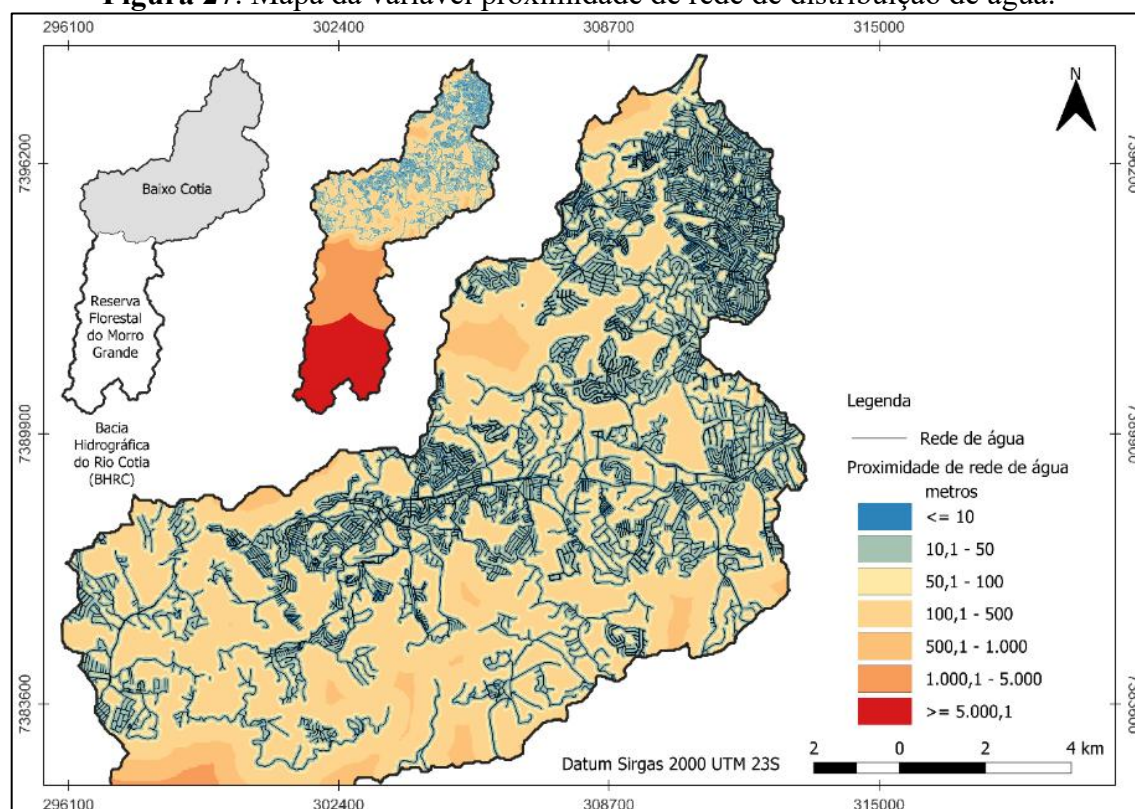
Fonte: Autoria própria.

A Figura 26 apresenta a proximidade das áreas em relação à rede coletora de esgoto, evidenciando uma concentração mais densa e próxima à rede (< 10 metros) nas regiões centrais e norte da bacia, representadas em tons de verde. Essas áreas indicam maior disponibilidade e acesso ao serviço de coleta, facilitando a conexão dos imóveis ao sistema existente. Em contraste, as áreas mais afastadas, em tons de vermelho (> 5.000 metros), predominam no extremo sul e sudoeste, revelando a necessidade de expansão da infraestrutura para alcançar essas regiões. Esse padrão reforça a importância da proximidade da rede coletora como variável chave para o planejamento de obras de universalização,

garantindo que áreas desconectadas possam ser integradas ao sistema de esgotamento sanitário da BHRC.

A variável proximidade de rede de água (Figura 27) influencia a expansão de cobertura de esgotamento sanitário, pois áreas próximas a essas redes são priorizadas devido à infraestrutura já existente, o que reduz custos e simplifica a instalação. Do ponto de vista ambiental, a proximidade de uma rede de água ajuda a minimizar os riscos de desabastecimento.

Figura 27. Mapa da variável proximidade de rede de distribuição de água.

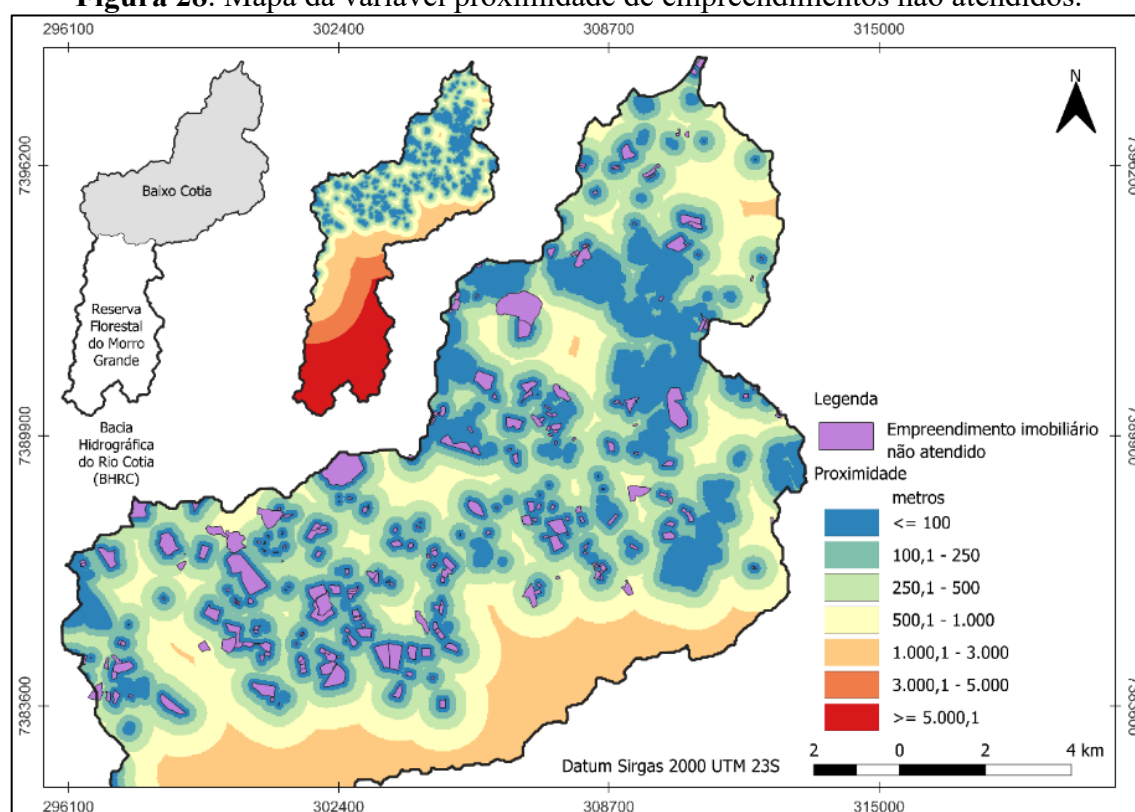


Fonte: Autoria própria.

A Figura 27 exibe a proximidade da rede de distribuição de água na BHRC, destacando uma cobertura densa e acessível nas regiões centrais e norte, onde a proximidade é inferior a 50 metros (tons de azul e verde). Nas áreas mais afastadas, principalmente no extremo sul e oeste, predominam distâncias superiores a 1.000 metros (tons laranja e vermelho), indicando a necessidade de expansão da infraestrutura. A distribuição da rede de água reflete a similaridade espacial com a rede coletora de esgoto, uma vez que ambas geralmente acompanham o traçado das vias urbanas.

A variável proximidade de empreendimentos imobiliários não atendidos (Figura 28) influencia a expansão de SES, pois identifica regiões com demanda potencial por infraestrutura de esgoto. Áreas próximas a esses empreendimentos são priorizadas para a expansão, visando atender à crescente necessidade de saneamento básico. Sob a perspectiva ambiental, a inclusão dessas áreas ao SES ajuda a prevenir a contaminação do solo e dos corpos d'água, promovendo um desenvolvimento urbano mais sustentável e melhorando a qualidade de vida dos moradores desses empreendimentos.

Figura 28. Mapa da variável proximidade de empreendimentos não atendidos.



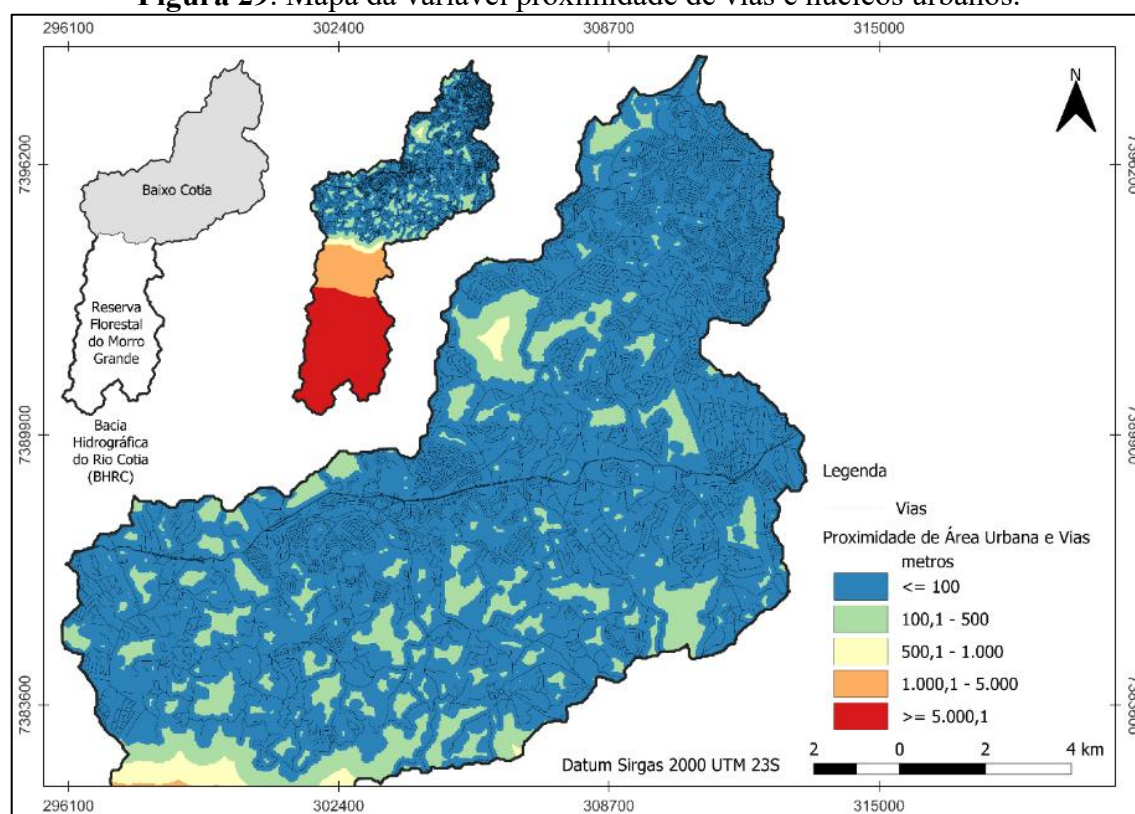
Fonte: Autoria própria.

A Figura 28 apresenta que as áreas em destaque, representadas em tons roxos, indicam a localização de empreendimentos sem acesso à rede de esgotamento sanitário. Observa-se que a maioria dos empreendimentos está concentrada em regiões já urbanizadas, com proximidade inferior a 500 metros em áreas centrais e intermediárias (tons azul escuro e verde). Em contraste, as zonas periféricas e de expansão urbana possuem distâncias superiores a 3.000 metros (tons laranja e vermelho), refletindo a necessidade de ampliação da infraestrutura de coleta nessas regiões. Essa variável é crucial para identificar prioridades de investimento e garantir que novos empreendimentos imobiliários sejam integrados ao SES, evitando a intensificação de lançamentos de esgoto não tratado e promovendo o avanço sustentável do saneamento na bacia.

A variável proximidade de vias e núcleos urbanos (Figura 29) influencia a expansão de cobertura de esgotamento sanitário, pois regiões próximas a vias principais e centros urbanos são mais acessíveis e economicamente viáveis para a instalação de infraestrutura de esgoto. Essas áreas são priorizadas devido à facilidade de acesso e à maior densidade populacional.

Em termos ambientais, a proximidade de vias e núcleos urbanos facilita a gestão e manutenção das redes de esgoto, reduzindo o risco de vazamentos e contaminação, além de promover um desenvolvimento urbano mais ordenado e sustentável.

Figura 29. Mapa da variável proximidade de vias e núcleos urbanos.

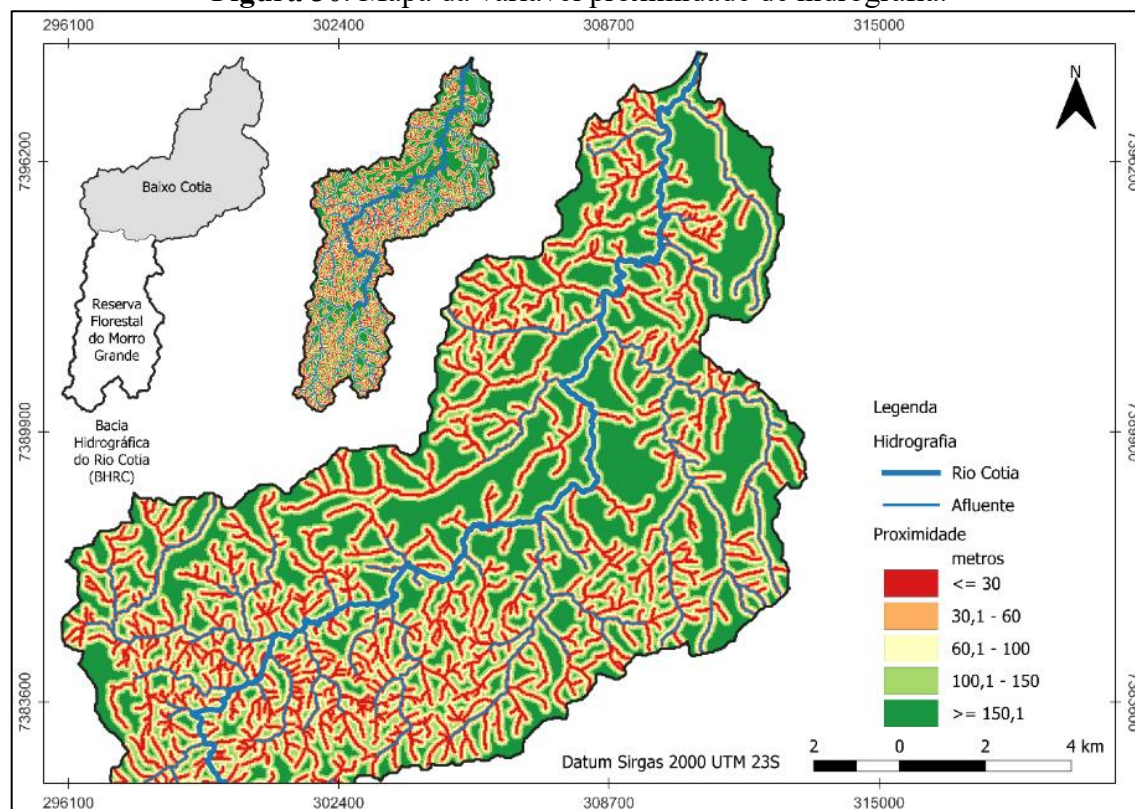


Fonte: Autoria própria.

A Figura 29 apresenta que as áreas em tons de azul predominam, indicando que grande parte da bacia possui alta densidade de vias e áreas urbanas, com proximidade inferior a 100 metros. Zonas em tons de verde claro, localizadas em áreas intermediárias, apresentam distâncias entre 100 e 1.000 metros, demonstrando menor conectividade com a malha urbana consolidada. Regiões periféricas destacam-se em tons laranja e vermelho, indicando proximidades superiores a 1.000 metros, a refletir menor densidade de infraestrutura viária e urbanização.

A variável proximidade de hidrografia (Figura 30) influencia também a expansão do SES, pois áreas próximas a corpos d'água, como rios e lagos, necessitam de sistemas de esgoto eficientes para evitar a contaminação hídrica. A instalação de redes de esgoto nessas áreas é priorizada para proteger os recursos hídricos e garantir a qualidade da água. Além disso, a proximidade de hidrografia facilita a gestão do esgotamento, contribuindo para a sustentabilidade ambiental e a preservação dos ecossistemas aquáticos.

Figura 30. Mapa da variável proximidade de hidrografia.



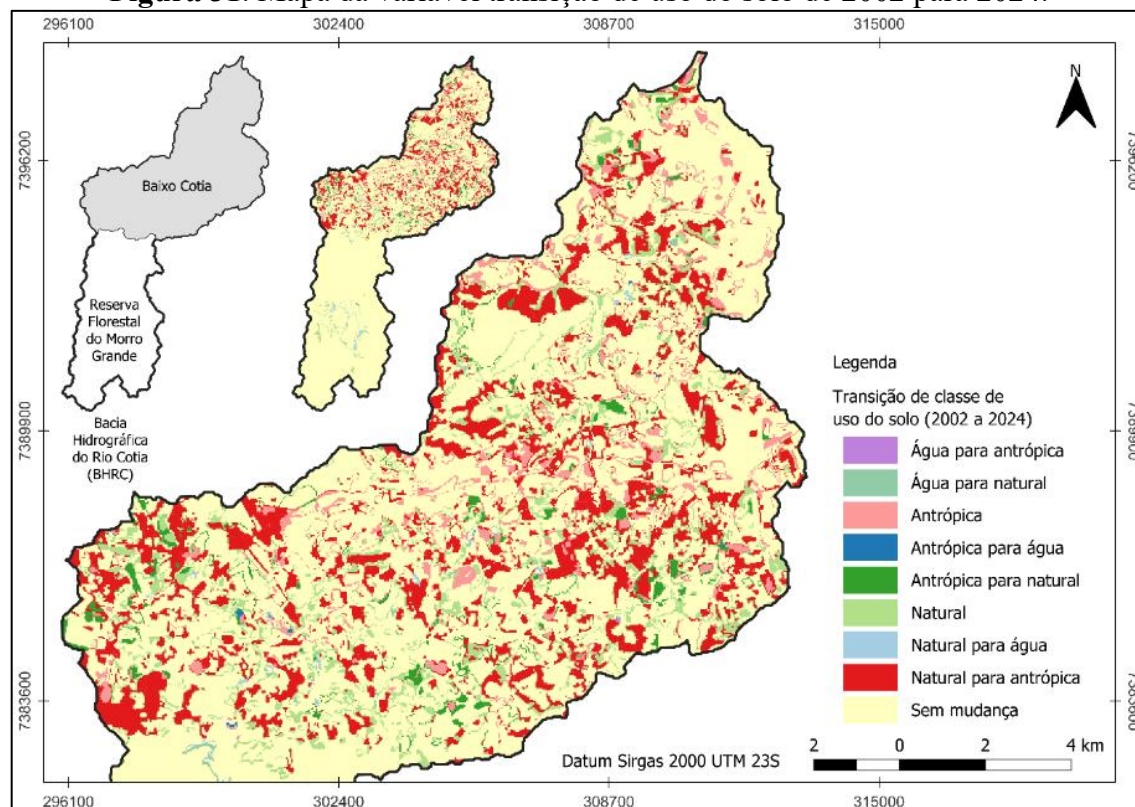
Fonte: Autoria própria.

A Figura 30 destaca a rede de drenagem composta pelo Rio Cotia e seus afluentes. As áreas em vermelho representam regiões extremamente próximas aos corpos hídricos, com distâncias de até 30 metros, enquanto as áreas em tons de verde, mais afastadas, indicam distâncias superiores a 150 metros. Nota-se uma ampla distribuição da rede hidrográfica, especialmente nas porções sul e central da bacia, onde as áreas próximas à hidrografia são predominantes. Essa proximidade é relevante para o planejamento do SES, uma vez que áreas próximas a rios e córregos estão mais suscetíveis a lançamentos de esgoto não tratado, erosão e contaminação dos corpos d'água.

A variável transição de uso do solo (Figura 31) influencia a expansão do SES ao identificar mudanças nas classes de uso do solo ao longo do tempo, sendo crucial para

entender como essas mudanças impactam a necessidade e a viabilidade da infraestrutura de esgoto. Sob a ótica ambiental, monitorar essas transições ajuda a prever áreas de maior demanda por saneamento, garantindo que o desenvolvimento urbano e rural ocorra de maneira sustentável e minimizando os impactos negativos sobre o território.

Figura 31. Mapa da variável transição de uso do solo de 2002 para 2024.



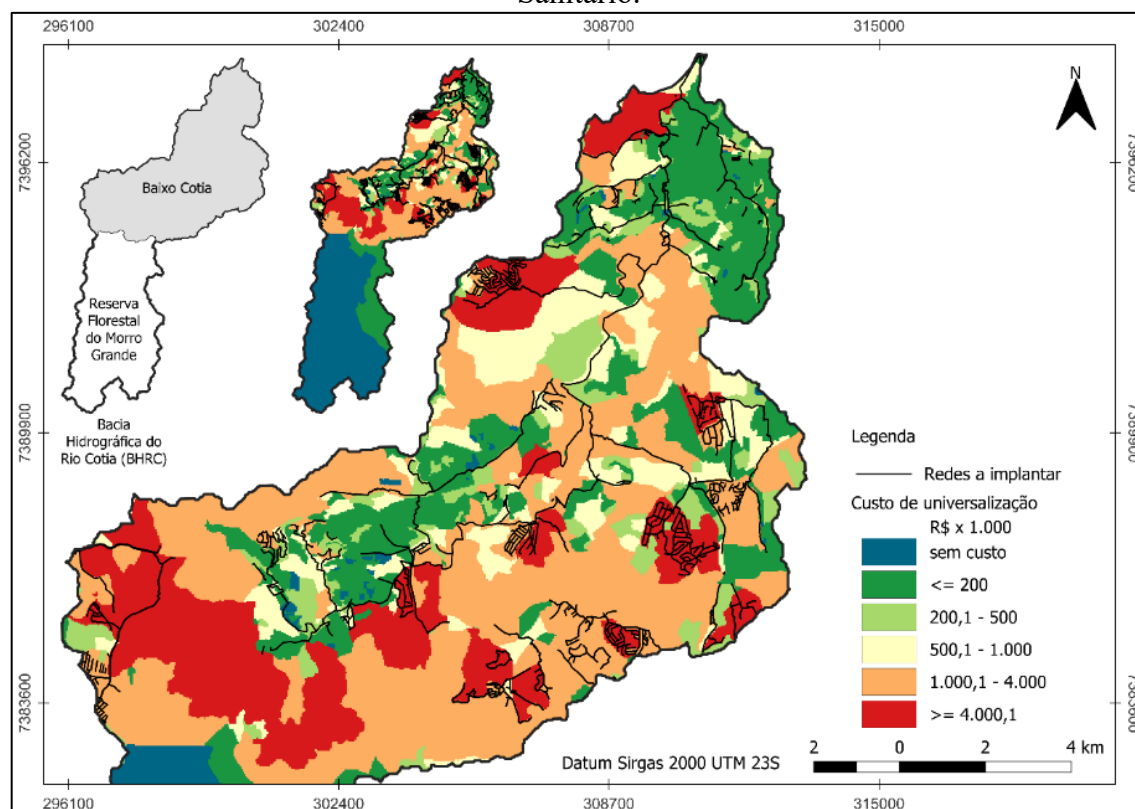
Fonte: Autoria própria.

A Figura 31 apresenta que as áreas em vermelho representam transformações para uso antrópico, evidenciando o avanço da urbanização, especialmente na região sul e em fragmentos dispersos pelo centro e norte da bacia. Em contraste, pequenas áreas em verde indicam a recuperação de uso natural, mas estas são significativamente menores em comparação às expansões urbanas. A predominância do amarelo reflete áreas sem mudanças, majoritariamente em regiões menos densas ou preservadas, como no Alto Cotia. Essas transições de uso do solo influenciam diretamente o sistema de esgotamento sanitário, pois o crescimento antrópico pressiona a infraestrutura existente, diminuindo a durabilidade das tubulações do SES.

A variável custo de universalização do SES (Figura 32) influencia a expansão de cobertura de esgotamento sanitário ao determinar a viabilidade econômica das obras necessárias para universalizar o sistema. Este custo inclui a instalação de redes coletoras,

coletores troncos, estações elevatórias de esgoto (EEE) e ligações na área de estudo. Considerando o impacto financeiro, áreas com menor custo de implementação são priorizadas. Do ponto de vista econômico, a otimização dos investimentos é essencial para garantir a sustentabilidade financeira dos projetos de saneamento, permitindo que mais regiões sejam cobertas de forma eficiente e eficaz.

Figura 32. Mapa da variável custo de universalização do Sistema de Esgotamento Sanitário.



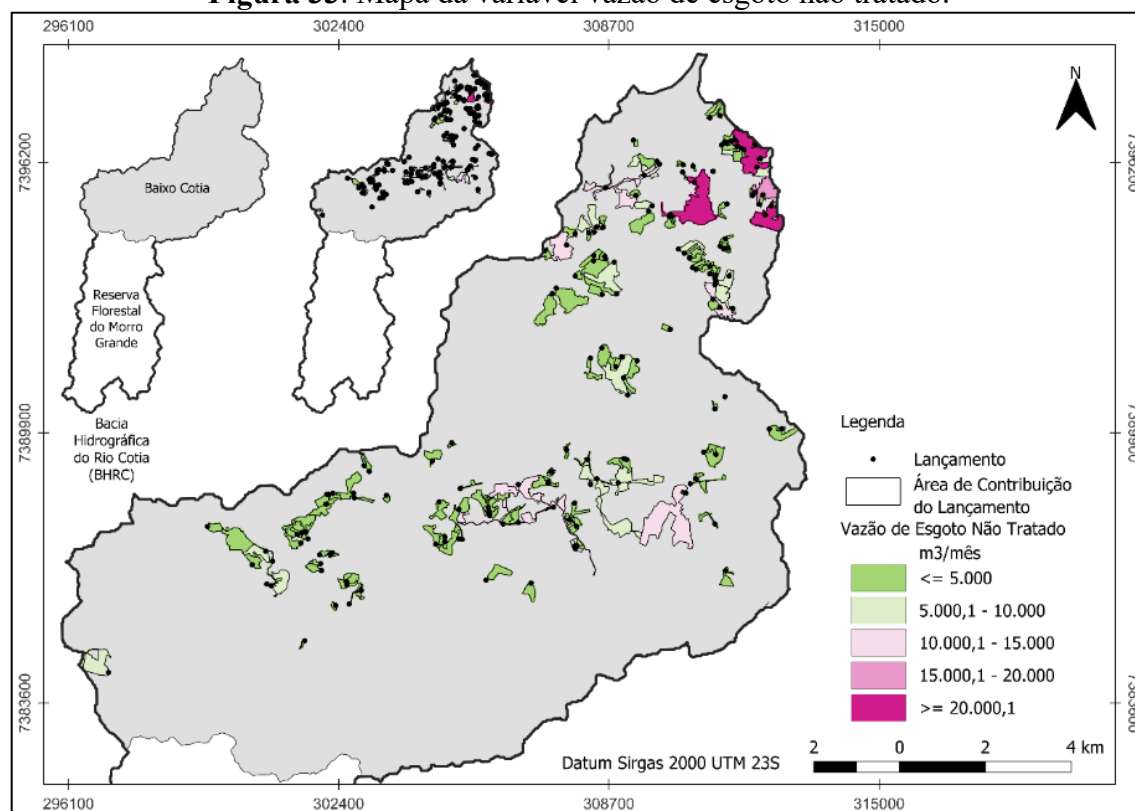
Fonte: Autoria própria.

A Figura 32 apresenta o custo de universalização do SES na BHRC, espacializado por setor censitário. Setores em vermelho, com custos acima de R\$ 4.000.000, predominam nas áreas urbanizadas do sul e sudoeste, enquanto setores em verde e amarelo, com custos menores (até R\$ 1.000.000), estão em regiões menos densas ou parcialmente cobertas.

Setores cinzas indicam áreas sem necessidade de obras adicionais. A distribuição dos custos reflete fatores como densidade populacional, declividade e proximidade de infraestrutura, sendo essencial para priorizar investimentos e garantir a universalização do esgotamento sanitário. O custo estimado para a universalização do sistema de esgotamento sanitário (SES) no Baixo Cotia é da ordem de R\$ 500 milhões, valor calculado pelo autor com base no banco de preços da Sabesp, considerando a data-base de maio de 2024.

A variável vazão de esgoto não tratado (Figura 33) influencia o comportamento da cobertura de tratamento ao identificar regiões onde o esgoto é lançado diretamente no meio ambiente sem tratamento. Mapear essas vazões é essencial para priorizar áreas que necessitam urgentemente de infraestrutura de esgoto. Do ponto de vista da sustentabilidade, reduzir a vazão de esgoto não tratado é crucial para proteger os corpos d'água e o solo da contaminação, além de ser uma obrigatoriedade prevista na legislação. A presença de esgoto não tratado pode levar à degradação ambiental, afetando a biodiversidade e a qualidade dos recursos hídricos.

Figura 33. Mapa da variável vazão de esgoto não tratado.



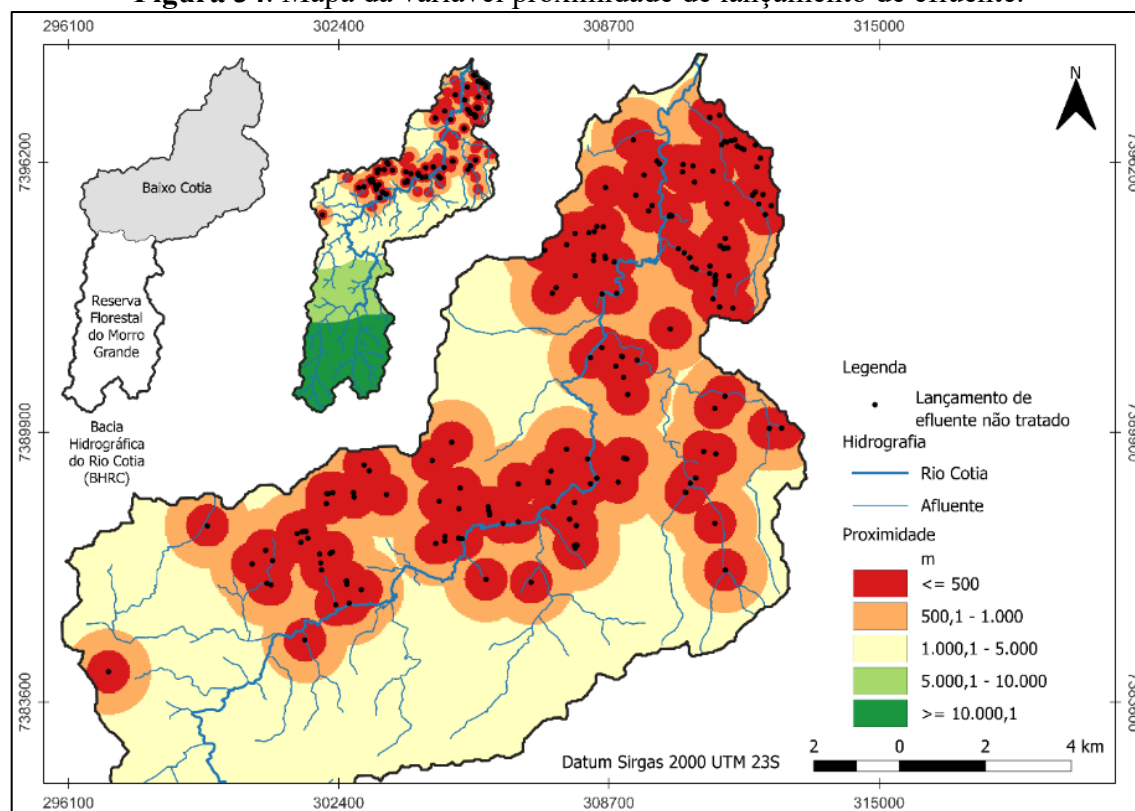
Fonte: Autoria própria.

A Figura 33 destaca as áreas com maiores vazões ($> 20.000 \text{ m}^3/\text{mês}$) em tons de rosa e magenta, concentradas no extremo norte e regiões centrais mais adensadas. Em contraste, áreas periféricas apresentam vazões menores ($0 \text{ a } 5.000 \text{ m}^3/\text{mês}$) em tons de verde claro. A distribuição reflete a relação entre densidade populacional e deficiência na infraestrutura de tratamento, evidenciando a necessidade de intervenções prioritárias para mitigar os impactos ambientais e ampliar a capacidade de tratamento de esgoto na bacia.

Por fim, a variável proximidade de lançamento de esgoto não tratado (Figura 34) influencia a expansão de cobertura de tratamento ao identificar regiões onde os esgotos são

lançados diretamente no meio ambiente. Áreas próximas a pontos de lançamento de esgotos são priorizadas para a instalação de infraestrutura de esgoto, visando reduzir a poluição e melhorar a qualidade da água. Sob a perspectiva da gestão ambiental, controlar e tratar os esgotos nesses locais é essencial para proteger os corpos d'água e garantir um ambiente mais limpo e seguro.

Figura 34. Mapa da variável proximidade de lançamento de efluente.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 34 apresenta a variável proximidade de lançamento de efluente na BHRC, destacando os pontos de lançamento em preto, distribuídos ao longo da rede hidrográfica. Áreas em vermelho indicam proximidade imediata aos pontos de efluente (< 500 metros), predominando em regiões mais urbanizadas e ao longo dos afluentes do Rio Cotia.

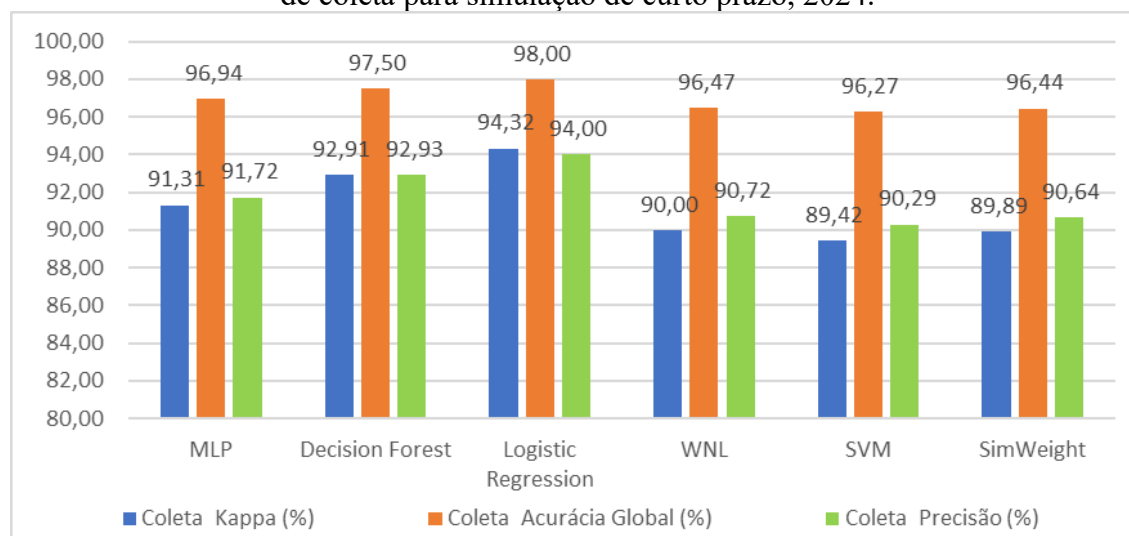
Já as zonas em tons amarelo e verde, com maior distância ($1.000 > 10.000$ metros), concentram-se nas áreas periféricas e menos impactadas. A proximidade dos lançamentos às redes hidrográficas representa uma vulnerabilidade ambiental significativa, pois acentua a contaminação dos corpos d'água e compromete a qualidade da água disponível. Esse cenário reforça a necessidade de expansão das coberturas de tratamento e redução dos lançamentos de esgoto não tratado, visando mitigar os impactos ambientais e promover a recuperação dos recursos hídricos na bacia.

A possibilidade de replicar e adaptar modelos espaciais depende de transparência na escolha das variáveis explanatórias, na resolução espacial e no intervalo de tempo analisado. Segundo Varnier (2024), que aplicou modelagem espacial aos biomas brasileiros, verifica-se que o desempenho do modelo varia conforme o conjunto de variáveis, o modo de agrupamento das transições de uso do solo e o detalhamento da validação; por isso, réplicas precisam publicar o procedimento completo, incluindo preparo dos dados, variáveis utilizadas e critérios de comparação entre mapas observados e simulados.

7.5 ANÁLISE DA ESCOLHA DOS MODELOS MATEMÁTICOS DE TRANSIÇÃO

A Figuras 35 e 36 apresentam os gráficos dos indicadores de desempenho para os seis modelos matemáticos de potencial de transição da cobertura de coleta e tratamento de esgoto, respectivamente, para a simulação de curto prazo, ano de 2024.

Figura 35. Gráfico de indicadores de desempenho dos modelos matemáticos de cobertura de coleta para simulação de curto prazo, 2024.

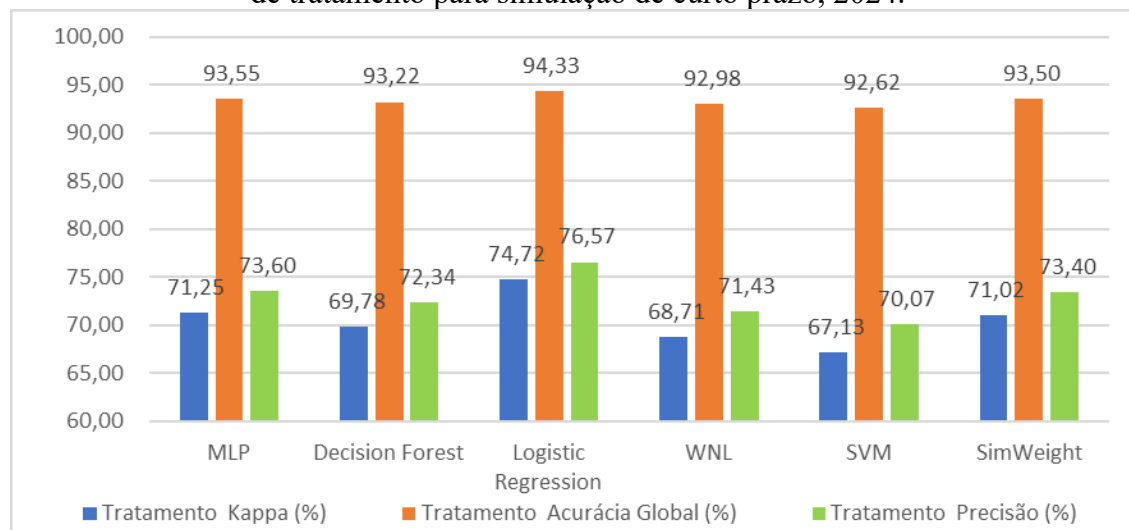


Fonte: Autoria própria.

Analisando a Figura 35, observa-se que a Regressão Logística obteve o melhor desempenho em termos de Kappa, atingindo 94%. Este indicador demonstra uma alta concordância entre os resultados simulados e os dados reais. O SimWeight e o Decision Forest também apresentaram valores elevados de Kappa, próximos a 93%, indicando consistência no desempenho desses modelos. Já o MLP ficou ligeiramente abaixo, com um Kappa de 91,31%. Em relação à Acurácia Global, os valores são uniformemente altos em todos os modelos, com destaque novamente para a Regressão Logística, que alcançou 98%.

Esse resultado reflete a robustez do modelo para identificar corretamente as coberturas de coleta simuladas. Por outro lado, a Precisão, que avalia a proporção de resultados positivos verdadeiros, apresentou maior variação entre os modelos, com o MLP e o SimWeight se destacando, enquanto o WNL apresentou um desempenho inferior em comparação aos demais.

Figura 36. Gráfico de indicadores de desempenho dos modelos matemáticos de cobertura de tratamento para simulação de curto prazo, 2024.



Fonte: Autoria própria.

Analisando a Figura 36, nota-se uma redução geral nos valores dos índices em relação à coleta. A Regressão Logística mantém o melhor desempenho, com um Kappa de 74,72%, refletindo a maior dificuldade em modelar coberturas de tratamento, que geralmente são menores e de geometria mais complexa. O SimWeight e o Decision Forest também mostraram resultados relativamente altos, com Kappa de 73,40% e 72,34%, respectivamente.

Em termos de Acurácia Global, a Regressão Logística lidera novamente com 94,33%, enquanto o SimWeight e o Decision Forest também alcançaram valores superiores a 93%, mostrando que esses modelos possuem boa capacidade de previsão geral. A Precisão, por sua vez, apresentou maior variabilidade, com o SimWeight e o Decision Forest obtendo valores próximos a 73%, enquanto o WNL ficou abaixo de 67%, revelando sua menor eficiência em capturar corretamente as coberturas de tratamento simuladas.

A Tabela 14 apresenta os resultados de p-valor dos testes Kappa e McNemar para cada modelo matemático testado, comparando-se o a cobertura do SES existente vs. SES simulado do ano de 2024, isto é, cenário de curto prazo.

Tabela 14. Valores de p-valor dos testes Kappa e McNemar, segundo modelos matemáticos testados para cenário de curto prazo, 2024.

Modelo	Coleta			Tratamento		
	p-valor Kappa	p-valor McNemar	χ^2	p-valor Kappa	p-valor McNemar	χ^2
MLP	< 0,0001	<0,001	566,0	< 0,0001	<0,001	98,0
Decision Forest	< 0,0001	<0,001	694,0	< 0,0001	<0,001	93,2
Regressão Logística	< 0,0001	<0,001	865,0	< 0,0001	<0,001	111,0
WNL	< 0,0001	<0,001	492,0	< 0,0001	<0,001	90,3
SVM	< 0,0001	<0,001	465,0	< 0,0001	<0,001	85,7
SimWeight	< 0,0001	<0,001	486,0	< 0,0001	<0,001	97,2

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 14 mostra que os p-valores do Teste Kappa são inferiores a 0,0001 para todos os modelos, nas coberturas de coleta e tratamento, evidenciando concordância estatisticamente significativa entre os mapas simulados e o mapa existente, acima do acaso. Esses resultados confirmam a capacidade dos modelos de reproduzir padrões espaciais globais de forma consistente, ainda que com variações específicas.

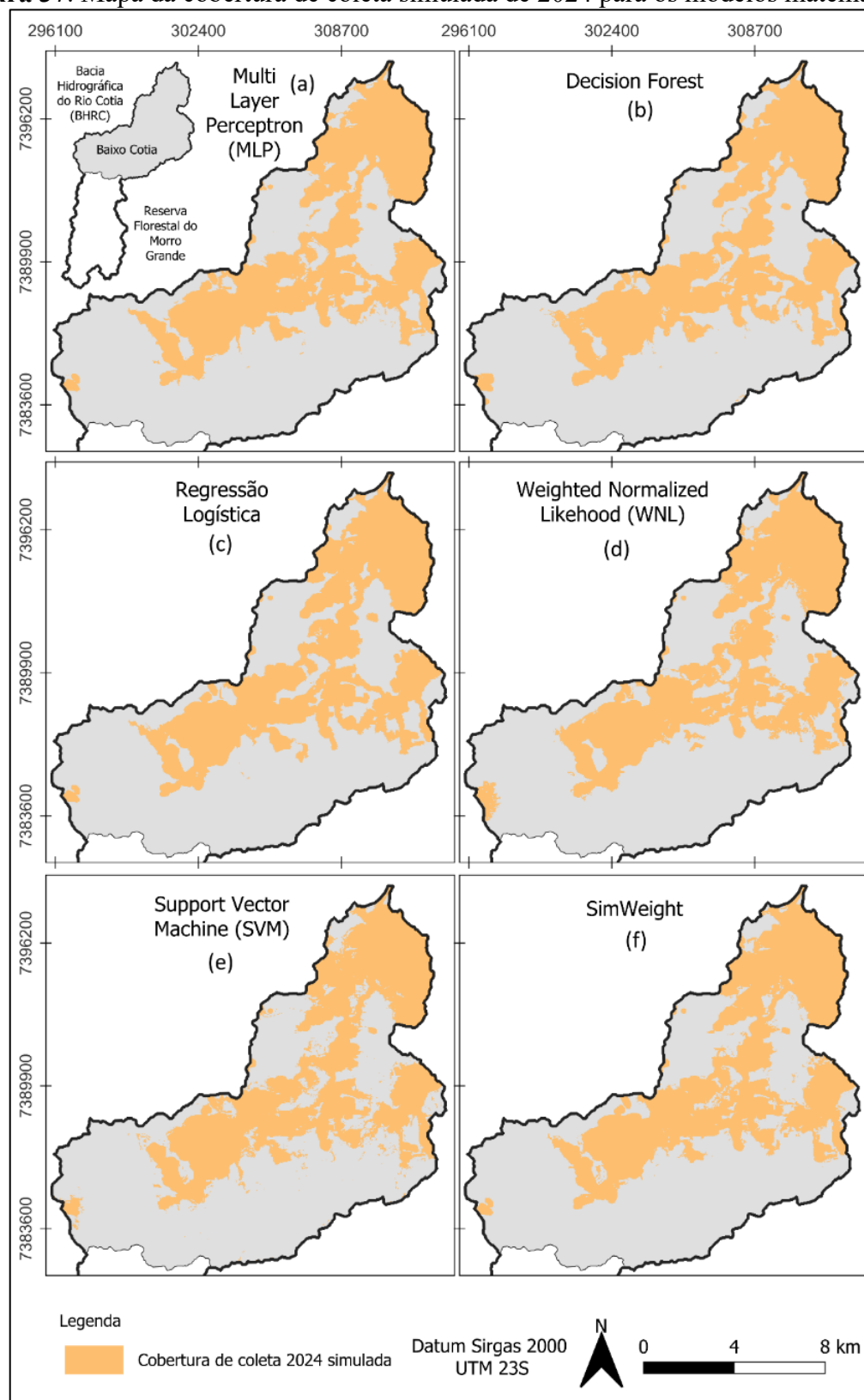
No entanto, os p-valores do Teste de McNemar, inferiores a 0,001, indicam diferenças estatisticamente significativas entre as classificações de pixels dos mapas simulados e do mapa existente. Essa discrepância é reforçada pelos valores de χ^2 , que variam entre os modelos, com a Regressão Logística apresentando os maiores valores ($\chi^2 = 865$ para coleta), indicando maior número de discordâncias.

Em síntese, os modelos capturam adequadamente os padrões gerais de cobertura (Kappa), mas apresentam limitações em áreas específicas, conforme indicado pelo Teste de McNemar.

Nas projeções de uso e ocupação do solo, a combinação de redes neurais multicamadas e cadeias de Markov apresenta bons resultados quando a arquitetura, os parâmetros de aprendizagem e as matrizes de transição são devidamente documentados e ajustados ao contexto local (VARNIER, 2024). Estudos nacionais ressaltam a importância de reportar métricas de concordância e calibrar variáveis socioeconômicas e físicas ao território de aplicação, assegurando maior precisão na replicação do método (BUENO, 2023).

As Figura 37 e 38 apresentam, respectivamente, os mapas de cobertura de coleta e tratamento de esgoto, no ano de 2024, para cada modelo matemático.

Figura 37. Mapa da cobertura de coleta simulada de 2024 para os modelos matemáticos.



Fonte: Autoria própria.

Ao analisar o mapa dos seis modelos matemáticos testados para a cobertura de coleta simulada em 2024 (Figura 37), observa-se variações importantes na distribuição espacial das áreas previstas.

O MLP (Figura 37a) destaca-se pela abrangência, cobrindo quase todas as regiões previstas para expansão, embora possa superestimar em algumas zonas ao incluir áreas menos viáveis.

Analisando a Figura 37b, verifica-se que o Decision Forest, por outro lado, mostra áreas mais concentradas e fragmentadas, indicando menor continuidade na expansão, o que pode dificultar a conexão efetiva das redes coletoras.

O mapa da Regressão Logística (Figura 37c) apresenta uma distribuição espacial equilibrada, com áreas contínuas que abrangem tanto regiões centrais quanto periféricas da bacia, refletindo coerência na transição entre as áreas já atendidas e as novas simuladas.

O mapa do WNL (Figura 37d) apresenta uma distribuição mais conservadora, com áreas de expansão menores e fragmentadas, priorizando aquelas com maior probabilidade de transição imediata.

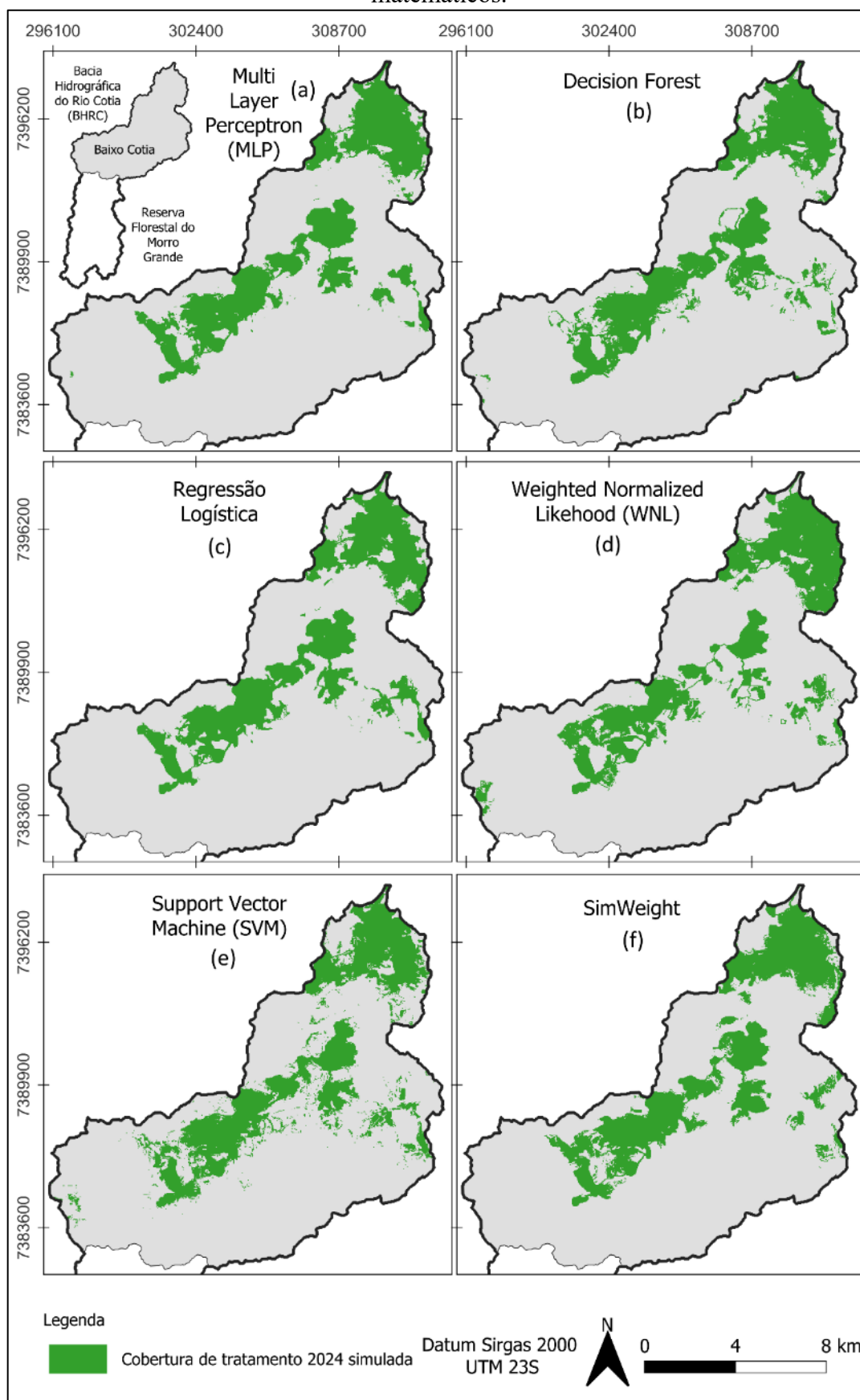
Já o SVM (Figura 37e) exibe um comportamento intermediário, com áreas mais conectadas do que o WNL, mas menos abrangentes do que o MLP e a Regressão Logística.

O SimWeight (Figura 37f), por sua vez, apresenta um padrão semelhante ao MLP, com boa continuidade espacial, mas apresenta pequenas fragmentações em regiões periféricas.

Esses resultados indicam que o MLP, a Regressão Logística e o SimWeight fornecem as simulações mais robustas e coerentes, enquanto o WNL e o Decision Forest apresentam maior fragmentação, o que pode comprometer sua aplicação prática.

Essas variações refletem as diferenças na forma como cada modelo interpreta os potenciais de transição e a dinâmica espacial das coberturas de coleta. A análise reforça a importância de considerar tanto a conectividade espacial quanto a viabilidade prática no planejamento da cobertura de esgotamento sanitário, garantindo que o sistema seja eficaz e sustentável.

Figura 38. Mapa da cobertura de tratamento simulada de 2024 para os modelos matemáticos.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 38 evidencia diferenças significativas entre os modelos testados para a cobertura de tratamento de 2024, ressaltando a complexidade do planejamento de esgotamento sanitário.

Entre os modelos, o MLP (Figura 38a) demonstrou ampla abrangência na bacia, com algumas áreas apresentando ligeiros exageros ou desconexões pontuais, que podem influenciar a representatividade prática do modelo em situações específicas.

O Decision Forest (Figura 38b), por outro lado, apresenta uma distribuição mais fragmentada, com coberturas de tratamento menores e dispersas. Esse padrão pode dificultar a efetiva conexão entre as áreas já atendidas e as novas expansões, comprometendo a eficiência do sistema de esgotamento sanitário.

A Regressão Logística (Figura 37c) apresenta um padrão espacial contínuo e homogêneo, abrangendo tanto as áreas centrais quanto periféricas da bacia hidrográfica, refletindo uma coerência com a expansão gradual e estruturada das redes de tratamento. A continuidade espacial fornecida pela Regressão Logística é crucial para conectar eficientemente as redes coletoras às estações de tratamento, evitando lacunas que possam levar a novos pontos de lançamento de esgoto nos corpos d'água.

O WNL (Figura 38d) exibe uma abordagem mais conservadora, com coberturas de tratamento menores e focadas em regiões de maior probabilidade de transição. Embora essa abordagem priorize áreas críticas, pode limitar a abrangência necessária para atender às demandas de universalização.

O SVM (Figura 38e) apresenta um comportamento intermediário, com áreas relativamente contínuas, mas ainda apresenta fragmentações, principalmente nas bordas das áreas simuladas, o que pode gerar lacunas no tratamento dos esgotos.

Já o SimWeight (Figura 38f) fornece uma distribuição espacial que combina continuidade e abrangência, embora apresente fragmentações localizadas em regiões periféricas, o que pode refletir pequenos ajustes necessários para alinhar melhor o modelo com a realidade.

Com base nos indicadores de desempenho avaliados, incluindo os índices Kappa, as análises qualitativas dos mapas gerados e os valores de p, a Regressão Logística foi eleita

como o modelo mais adequado para, portanto, prosseguir com as predições do Sistema de Esgotamento Sanitário (SES), de 2024.

A Tabela 15 apresenta os parâmetros obtidos da Regressão Logística para a simulação de curto prazo (2024), conforme relatório emitido pelo LCM.

Tabela 15. Parâmetros do modelo Regressão Logística da simulação de curto prazo, 2024.

Descrição	Coeficiente	
	Coleta	Tratamento
Intercepto	0,9586	2,1049
Consumo de água	3,253E-05	1,255E-05
Declividade do terreno	-0,0195	-0,0171
Densidade demográfica	3,804E-05	3,763E-05
Proximidade de ocorrência de manutenção em rede	2,465E-04	-0,0022
Proximidade das unidades não atendidas	0,0032	9,767E-04
Proximidade das áreas de expansão	-0,0011	4,456E-04
Proximidade de Estação de Tratamento de Esgoto (ETE)	-1,932E-04	-1,801E-04
Proximidade de Estação Elevatórias de Esgoto (EEE)	3,313E-04	-8,629E-04
Proximidade de rede coletora	-0,0110	-0,0233
Proximidade de rede de distribuição	-2,605E-04	0,0028
Proximidade dos empreendimentos imobiliários não atendidos	-0,0022	-6,817E-04
Proximidade de vias e núcleos urbanos	-0,0036	-0,0011
Proximidade de hidrografia	-9,019E-04	-0,0014
Transição do uso de ocupação do solo de 2002 para 2024	-0,0067	-0,0016
Custo de universalização do SES	-2,487E-07	-2,598E-07
Vazão de esgoto não tratado	5,113E-05	-1,089E-04
Proximidade de lançamento de efluente	-1,656E-04	0,0012
Número total de observações	239.333	279.123
Pseudo R ²	0,5941	0,5716
Chi-square	2.066,6287	7.354,6651
<i>Receiver Operating Characteristics (ROC)</i>	0,9767	0,9703
<i>Odds Ratio</i>	140,8594	53,0112
Verdadeiro positivo	93,23%	97,97%
Falso positivo	1,49%	2,66%
<i>Log-likelihood</i>	1.411,9108	5.511,0815

Fonte: Autoria própria.

Conforme análise da Tabela 15, o valor do intercepto é maior no modelo de tratamento (2,1049) do que no modelo de coleta (0,9586), indicando uma diferença na influência das variáveis externas na probabilidade de cobertura.

Em relação ao coeficiente das variáveis (Tabela 15), o consumo de água tem coeficiente positivo em ambos os modelos, mas com maior impacto na cobertura de coleta do que na cobertura de tratamento, reforçando sua relevância como agente de demanda por infraestrutura. A declividade do terreno apresenta coeficientes negativos em ambos os casos, confirmando que terrenos mais íngremes dificultam a expansão de redes.

A proximidade de rede coletora e de rede de distribuição também têm valores negativos, indicando que distâncias próximas da infraestrutura existente facilitam o atendimento, reduzem o custo e complexidade técnica. A proximidade de unidades não atendidas e das áreas de expansão mostra efeitos positivos, corroborando que essas variáveis estão relacionadas a maiores chances de inclusão futura ao SES existente. Algumas variáveis, como proximidade de lançamento de efluente, tem sinais opostos nos dois modelos, refletindo diferenças contextuais entre coleta e tratamento.

A análise da Tabela 15 aponta que o Pseudo R^2 , que mede a proporção de variação explicada pelas variáveis independentes em relação ao resultado, indica ajuste razoável dos modelos, com valores de 0,5941 para coleta e 0,5716 para tratamento, sugerindo que uma parcela significativa da variação é explicada pelos fatores incluídos na análise. O Chi-square, utilizado para testar a significância global do modelo, também apresenta valores elevados, sendo 2.066,6287 para coleta e 7.354,6651 para tratamento, reforçando a contribuição significativa das variáveis no modelo preditivo.

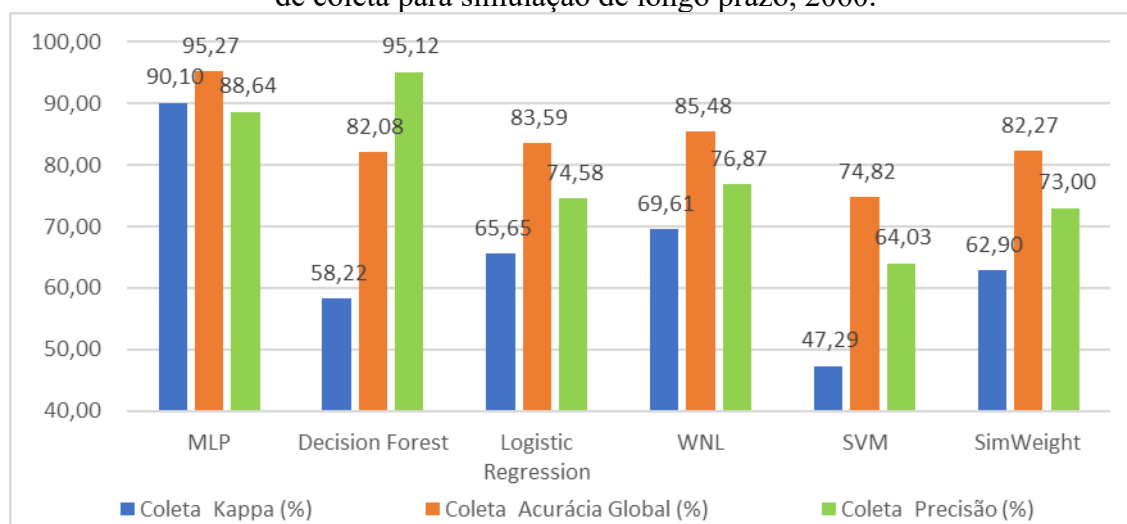
O *Receiver Operating Characteristics* (ROC), que avalia a capacidade discriminatória do modelo ao medir a relação entre verdadeiro positivo e falso positivo, revela desempenhos consistentes, com 0,9767 para coleta e 0,9703 para tratamento, indicando alta precisão na separação entre áreas cobertas e não cobertas. Já o *Odds Ratio*, que reflete a razão entre as chances de verdadeiro positivo e falso positivo, evidencia diferenças entre os modelos, sendo mais elevado para a coleta (140,8594) em comparação com o tratamento (53,0112), o que sugere maior dificuldade do modelo de coleta em diferenciar algumas classes de pixels.

Por fim, o *Log-likelihood*, que mede o ajuste do modelo aos dados observados e é utilizado na maximização da probabilidade de ocorrência das transições previstas, mostra valores significativos para ambos os cenários, sendo 1.411,9108 para coleta e 5.511,0815 para tratamento.

Na Regressão Logística, é prudente lembrar que melhor ajuste (ROC elevado) não garante melhor acurácia espacial do cenário simulado. Comparações recentes mostram que variantes aprimoradas podem ter ROC alto e ainda assim pior desempenho em métricas espaciais; por isso, réplicas devem testar múltiplos modelos sob as mesmas métricas e não só métricas de classificação (QIN et al., 2025).

As Figuras 39 e 40 apresentam os gráficos dos indicadores de desempenho para os seis modelos matemáticos de potencial de transição das coberturas de coleta e tratamento, respectivamente, para a simulação de longo prazo, ano de 2060.

Figura 39. Gráfico de indicadores de desempenho dos modelos matemáticos de cobertura de coleta para simulação de longo prazo, 2060.

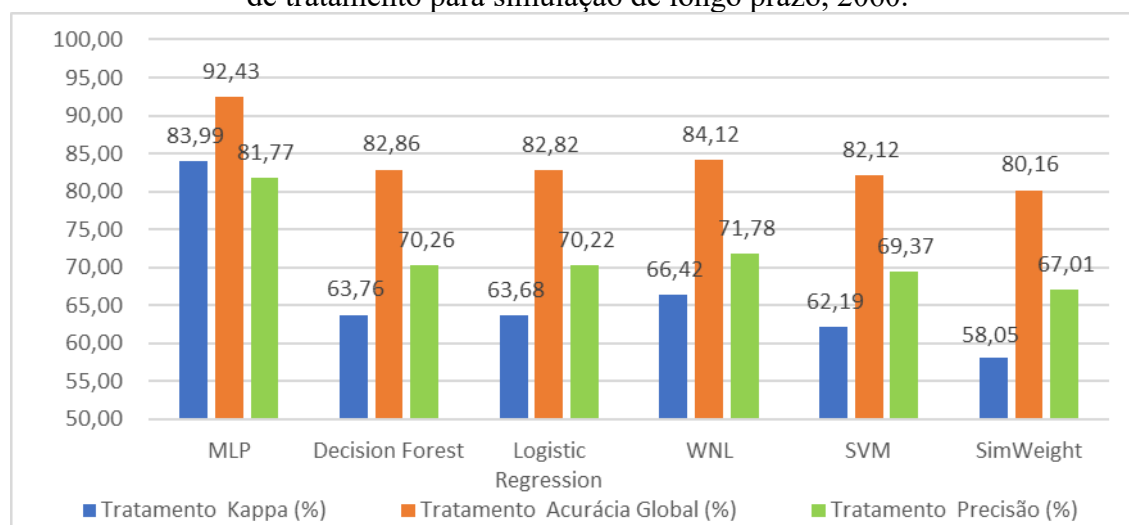


Fonte: Autoria própria.

Analisando a Figura 40, verifica-se que o MLP se destaca como o modelo mais robusto, com o Kappa de 90,10%, Acurácia Global de 95,27% e Precisão de 88,64%. Esses resultados indicam alta concordância entre os mapas simulados e reais, além de excelente desempenho geral, mesmo para projeções a longo prazo.

A Regressão Logística, que mostrou forte desempenho a curto prazo, apresenta uma queda significativa, com Kappa de 65,65% e Precisão de 74,58%, revelando dificuldades para lidar com cenários futuros. Modelos como Decision Forest e SimWeight possuem resultados intermediários, mas ainda distantes do desempenho do MLP, com destaque para o SimWeight, que alcançou Precisão de 73,00%. Os modelos WNL e SVM apresentam os piores desempenhos, especialmente o SVM, com um Kappa extremamente baixo de 47,29% e Precisão de 62,90%, indicando baixa confiabilidade para projeções de longo prazo na cobertura de coleta.

Figura 40. Gráfico de indicadores de desempenho dos modelos matemáticos de cobertura de tratamento para simulação de longo prazo, 2060.



Fonte: Autoria própria.

Analisando a Figura 40, observa-se que o MLP apresenta os melhores indicadores gerais, com destaque para o Kappa (83,99%), a Acurácia Global (92,43%) e a Precisão (81,77%). Esses valores indicam que o modelo consegue manter alta concordância e precisão mesmo em cenários de longo prazo, mostrando-se mais robusto para projeções distantes.

Embora a Regressão Logística tenha apresentado desempenho superior para o ano de 2024, seu Kappa (70,26%) e Precisão (63,68%) caem significativamente em 2060, sugerindo que o modelo perde consistência ao lidar com períodos mais extensos. Os outros modelos, como o Decision Forest, SVM e WNL apresentam valores intermediários, enquanto o SimWeight continua com o pior desempenho, com destaque negativo para o Kappa de 58,05%.

A Tabela 16 apresenta os resultados de p-valor dos testes Kappa e McNemar para cada modelo matemático testado, comparando-se o a cobertura do SES existente vs. SES simulado do ano de 2060, isto é, cenário de longo prazo.

Tabela 16. Valores de p-valor dos testes Kappa e McNemar, segundo modelos matemáticos testados para cenário de longo prazo, 2060.

Modelo	Coleta			Tratamento		
	p-valor Kappa	p-valor McNemar	χ^2	p-valor Kappa	p-valor McNemar	χ^2
MLP	< 0,0001	<0,001	13.202,0	< 0,0001	<0,001	21.321,0
Decision Forest	< 0,0001	<0,001	9.557,0	< 0,0001	<0,001	9.421,0
Regressão Logística	< 0,0001	<0,001	3.804,0	< 0,0001	<0,001	9.321,0
WNL	< 0,0001	<0,001	4.301,0	< 0,0001	<0,001	10.169,0

Modelo	p-valor Kappa	Coleta p-valor McNemar	χ^2	p-valor Kappa	Tratamento p-valor McNemar	χ^2
SVM	< 0,0001	<0,001	2.483,0	< 0,0001	<0,001	9.035,0
SimWeight	< 0,0001	<0,001	3.527,0	< 0,0001	<0,001	8.145,0

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 16 apresentou valores com comportamento semelhantes aos valores da Tabela 14, isto é, em relação ao teste de Kappa, todos os modelos apresentam p-valores menores que 0,0001, o que indica que a concordância observada entre as áreas simuladas e as reais é significativa.

Os dados da Tabela 16 demonstram que as coberturas simuladas para 2060 refletem padrões espaciais não aleatórios, validando a capacidade preditiva dos modelos. Novamente, no teste de McNemar, os p-valores também são inferiores a 0,001 para todos os modelos, sugerindo diferenças significativas nas classificações entre os momentos avaliados. Esse resultado evidencia a presença de variações importantes nas transições de coberturas simuladas entre os modelos testados.

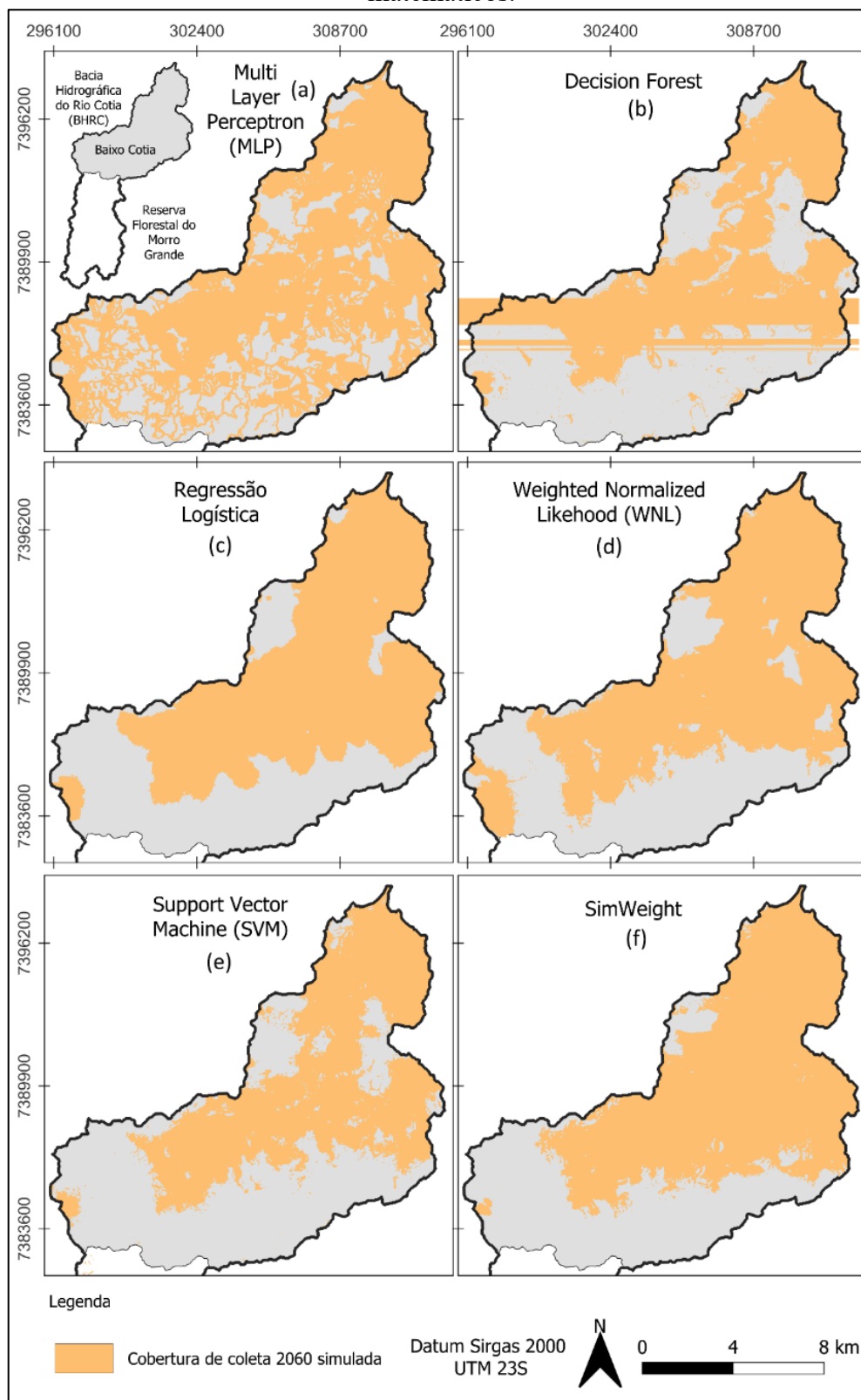
O teste do qui-quadrado (χ^2) é uma medida estatística que quantifica a discrepância entre valores observados e esperados. Valores mais baixos de χ^2 indicam maior concordância entre os conjuntos comparados, enquanto valores elevados refletem maior número de discordâncias (JAMOV, 2024).

Os valores de χ^2 destacam o MLP (Tabela 16) como o modelo mais sensível às transições de coberturas, com os maiores valores tanto para coleta (13.202,0) quanto para tratamento (21.321,0). Modelos como Decision Forest e WNL também apresentaram valores elevados, embora inferiores ao MLP. Por outro lado, Regressão Logística, SVM e SimWeight mostraram valores significativamente menores, o que pode refletir limitações na captura de padrões complexos em projeções de longo prazo.

A análise dos valores de χ^2 da Tabela 16 indica que as simulações de tratamento apresentam valores sistematicamente inferiores aos de coleta, evidenciando menor número de discordâncias pixel a pixel em relação ao mapa existente. Esse resultado sugere maior aderência espacial das simulações de tratamento, possivelmente associada à maior estabilidade estrutural do sistema, em contraste com a coleta, mais sensível à dinâmica urbana.

As Figura 41 e 42 apresentam, respectivamente, os mapas de cobertura de coleta e tratamento do ano de 2060, para cada modelo matemático.

Figura 41. Mapa da cobertura de coleta simulada do ano de 2060 para os seis modelos matemáticos.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 41a exibe que o modelo MLP apresenta uma distribuição espacial bem definida e consistente para a cobertura de coleta simulada em 2060. A capacidade do MLP de capturar padrões complexos entre as variáveis explica a sua precisão e abrangência, permitindo a projeção lógica das coberturas de coleta sem evidências de erros sistemáticos ou padrões artificiais.

O modelo Decision Forest (Figura 41b) evidencia uma anomalia significativa na distribuição dos pixels simulados para 2060. Observa-se a presença de padrões artificiais em forma de linhas horizontais, inclusive fora da área de estudo, indicando um erro sistemático no processo de classificação. Esses padrões comprometem a representatividade espacial do modelo, tornando-o inadequado para projeções de longo prazo. Apesar disso, ele pode ser útil para períodos mais curtos, desde que essas anomalias não afetem a análise.

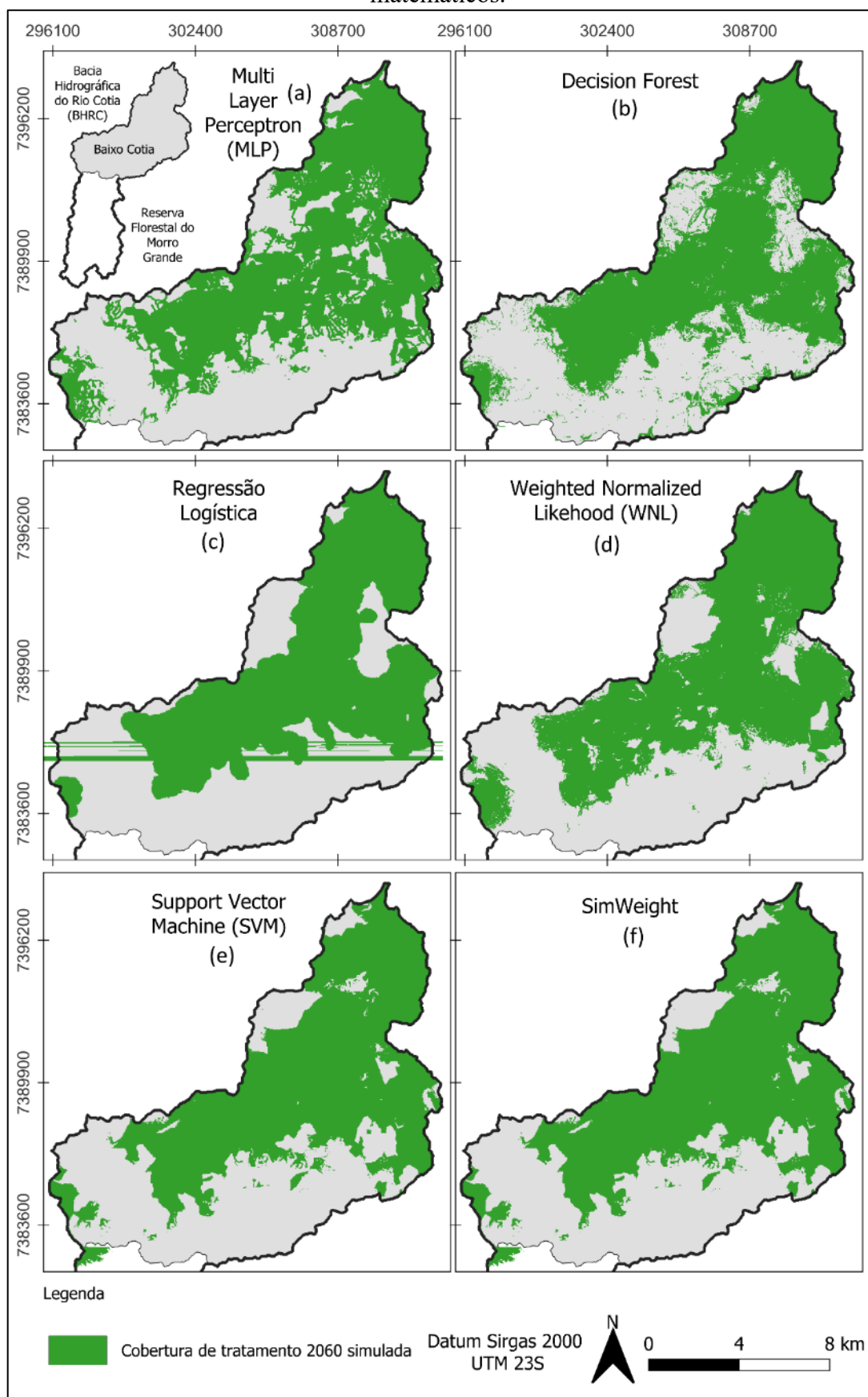
A Regressão Logística (Figura 41c) apresenta maior extensão de cobertura em comparação aos demais modelos, sem evidência de padrões artificiais ou inconsistências relevantes; contudo, tende a superdimensionar áreas onde não seria esperada a presença de cobertura.

O WNL (Figura 41d) produz uma simulação razoável, embora menos abrangente que o MLP. Sua distribuição das coberturas de coleta é coerente, mas tende a ser mais restritiva, priorizando áreas com maior correlação com variáveis preexistentes.

O SVM (Figura 41e) apresenta regiões simuladas de baixa conectividade, com uma abrangência de cobertura de coleta limitada e inconsistências na distribuição dos pixels simulados. A baixa cobertura e a dificuldade de lidar com padrões complexos sugerem que o modelo não é ideal para simulações de longo prazo. Sua aplicação em contextos mais simples pode ser válida, mas, neste caso, não atende aos requisitos do estudo.

O SimWeight (Figura 41f) apresenta uma distribuição similar ao SVM, embora com menor abrangência em relação ao MLP. O modelo prioriza áreas já parcialmente cobertas, resultando em uma expansão mais limitada.

Figura 42. Mapa da cobertura de tratamento simulada do ano de 2060 para os seis modelos matemáticos.



Fonte: Autoria própria.

Analisando a Figura 42a, compreende-se que o MLP apresenta uma simulação da cobertura de tratamento em 2060 bem distribuída e consistente, cobrindo grandes porções da bacia com uma coerência espacial significativa. Este modelo mantém a robustez já observada em outras análises, demonstrando sua eficácia em capturar padrões complexos de variáveis explanatórias.

A simulação de 2060 gerada pelo Decision Forest (Figura 42b) apresenta coberturas de tratamento fragmentadas, com lacunas consideráveis e irregularidades espaciais. Apesar de não apresentar anomalias de pixels dispostos em linhas horizontais como para a cobertura de coleta na Figura 41, o modelo não consegue manter uma coerência adequada em horizontes temporais mais extensos, possivelmente devido à sua limitação em lidar com padrões de transição complexos ao longo do tempo.

A Regressão Logística (Figura 42c) apresenta uma simulação sólida para a cobertura de tratamento em 2060, com áreas bem definidas e uma cobertura coerente, uma vez que tende a superestimar locais que não necessitam de coleta. No entanto, a abrangência do modelo é mais limitada em comparação ao MLP. Apesar disso, é uma escolha confiável para horizontes intermediários, como foi demonstrado em análises anteriores.

O modelo WNL apresenta uma simulação moderada para 2060 (Figura 42d), com uma cobertura razoável da cobertura de tratamento. No entanto, áreas de fragmentação são perceptíveis, sugerindo que o modelo é mais adequado para análises em que a priorização de áreas mais correlacionadas com variáveis explanatórias é suficiente.

A simulação gerada pelo SVM para 2060 (Figura 42e) demonstra uma abrangência reduzida e áreas fragmentadas, indicando que o modelo não é ideal para projeções a longo prazo. A falta de consistência espacial e a incapacidade de capturar padrões complexos refletem suas limitações em lidar com cenários mais desafiadores.

O SimWeight apresenta uma distribuição coerente e relativamente bem definida para a cobertura de tratamento em 2060 (Figura 42f). Contudo, sua abrangência é inferior à do MLP, sendo mais conservador na projeção de coberturas de tratamento.

A Tabela 17 apresenta os parâmetros obtidos do MLP para a simulação de longo prazo (2060), conforme relatório emitido pelo LCM.

Tabela 17. Parâmetros do modelo *Multi-Layer Perceptron* para simulação de longo prazo, 2060.

Descrição	Valor	
	Coleta	Tratamento
Neurônios de entrada	17	17
Neurônios escondidos	7	6
Taxa de aprendizado	0,001	0,001
Momemtum	0,50	0,50
Constante Sigmoide	1,0	1,0
Iterações	9.137	10.000
Medida de habilidade	90,19%	86,03%
Taxa de precisão	95,09	93,01%
Sensibilidade às variáveis – ordem de influência		
Consumo de água	11°	15°
Declividade do terreno	14°	16°
Densidade demográfica	13°	14°
Proximidade de ocorrência de manutenção em rede	6°	2°
Proximidade das unidades não atendidas	8°	6°
Proximidade das áreas de expansão	15°	10°
Proximidade de Estação de Tratamento de Esgoto (ETE)	3°	5°
Proximidade de Estação Elevatórias de Esgoto (EEE)	10°	7°
Proximidade de rede coletora	2°	1°
Proximidade de rede de distribuição	1°	3°
Proximidade dos empreendimentos imobiliários não atendidos	5°	8°
Proximidade de vias e núcleos urbanos	4°	4°
Proximidade de hidrografia	16°	12°
Transição do uso de ocupação do solo de 2002 para 2024	17°	17°
Custo de universalização do SES	9°	9°
Vazão de esgoto não tratado	12°	13°
Proximidade de lançamento de efluente	7°	11°

Fonte: Autoria própria.

Segundo a Tabela 17, o modelo utiliza 17 neurônios de entrada para ambas as áreas, refletindo a capacidade do MLP de lidar com múltiplas variáveis explanatórias simultaneamente, permitindo uma análise robusta de fatores interdependentes. A configuração de neurônios escondidos, com 7 para coleta e 6 para tratamento, indica um ajuste cuidadoso para modelar padrões complexos sem comprometer a simplicidade e a capacidade de generalização. Essa característica é uma vantagem do MLP, pois permite capturar nuances nos dados que outros modelos lineares, como a Regressão Logística, podem não representar adequadamente.

Os parâmetros de aprendizado (Tabela 17), como a taxa de 0,001 e o momentum de 0,50, são indicativos de um processo de treinamento controlado e estável, evitando oscilações durante o ajuste dos pesos neuronais. O número elevado de iterações, 9.137 para coleta e 10.000 para tratamento, reflete o esforço necessário para alcançar um modelo otimizado. O uso de constantes sigmóides de 1,0 proporciona uma ativação eficiente dos neurônios, contribuindo para a precisão dos resultados. A alta taxa de precisão, de 95,09% na coleta e 93,01% no tratamento, reforça a confiabilidade dos resultados gerados pelo modelo.

Ainda analisando a Tabela 17, verifica-se que a análise de sensibilidade às variáveis – uma função do LCM – destaca a importância de fatores como proximidade de rede coletora (2º na coleta e 1º no tratamento) e proximidade de rede de distribuição (1º na coleta e 3º no tratamento), que desempenham papéis centrais na configuração do SES. Variáveis como proximidade de unidades não atendidas (8º na coleta e 6º no tratamento) e proximidade de áreas de expansão (15º na coleta e 10º no tratamento) também são relevantes, refletindo a necessidade de priorizar regiões que ainda demandam investimentos em infraestrutura. Por outro lado, variáveis como transição do uso do solo de 2002 para 2024 (17º em ambas as áreas) têm influência limitada no modelo.

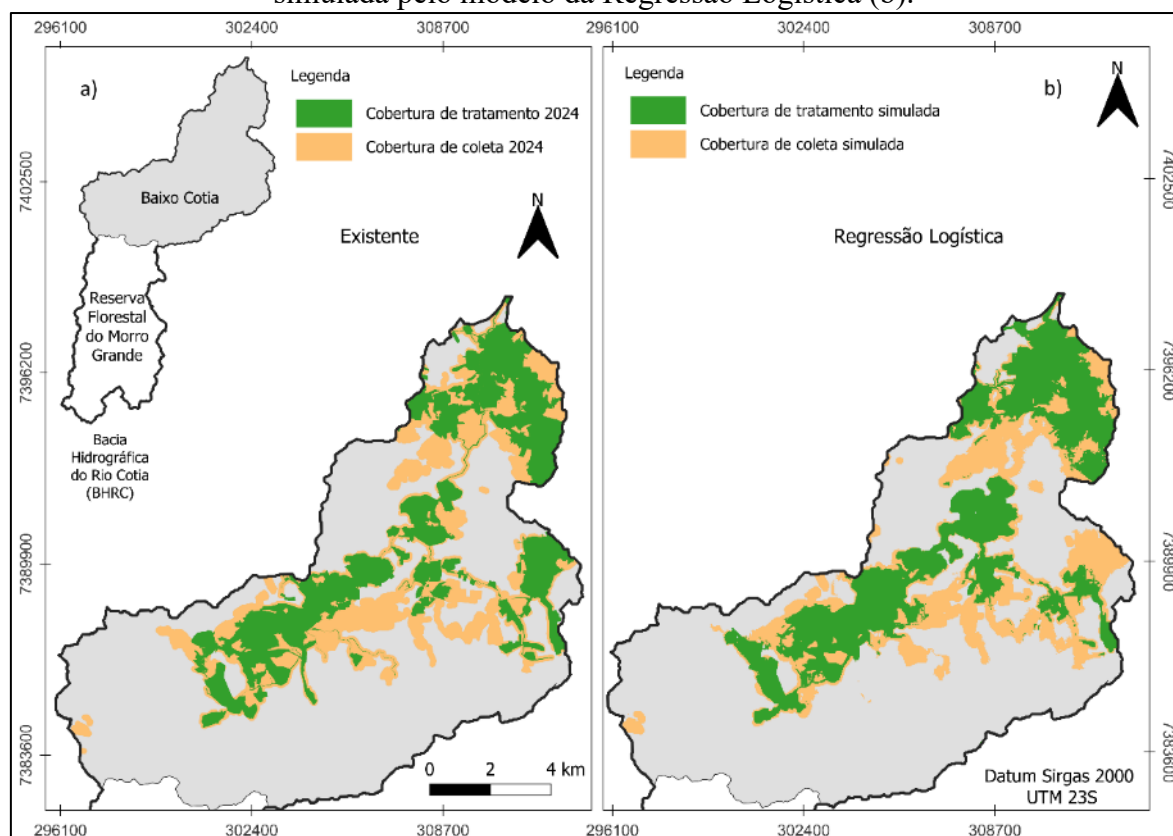
Uma ressalva importante ao uso do MLP na modelagem de esgotamento sanitário é sua característica de "caixa preta": embora seja extremamente eficiente para capturar as relações não lineares entre variáveis, como proximidade de redes e densidade demográfica, o modelo não permite compreender facilmente como cada variável contribui para o resultado. Isso pode ser um desafio ao planejar estratégias práticas para expansão do sistema, pois gestores e tomadores de decisão frequentemente precisam entender os fatores específicos que direcionam a cobertura e o tratamento de esgoto. Assim, mesmo que o MLP forneça previsões precisas, sua aplicabilidade operacional pode ser limitada pela dificuldade de explicar, de forma direta e intuitiva, como as variáveis modeladas influenciam a expansão do SES (SILVA et al., 2023a).

Portanto, o MLP demonstra ser uma abordagem robusta e adaptável para projeções de longo prazo, especialmente devido à sua capacidade de modelar padrões complexos e não lineares. Assim, após análise dos modelos matemáticos, em função dos indicadores de desempenho e concordância espacial, escolhe-se a Regressão Logística para a simulação de 2024 e o MLP para a simulação dos demais anos, isto é, de 2025 a 2080.

7.6 ANÁLISE DA PREDIÇÃO DA COBERTURA E VALIDAÇÃO

A Figura 43 apresenta o mapa de comparação entre a cobertura de coleta e de tratamento existente com a cobertura simulada de 2024 pelo modelo de Regressão Logística.

Figura 43. Mapa comparativo da cobertura existente de 2024 (a) entre a cobertura simulada pelo modelo da Regressão Logística (b).



Fonte: Autoria própria.

A Figura 43 evidencia uma significativa similaridade espacial entre a cobertura existente (43a) e a cobertura simulada pelo modelo de Regressão Logística (43b) para o ano de 2024, tanto no que se refere à coleta quanto ao tratamento de esgoto. Essa similaridade é corroborada pelas dimensões das áreas analisadas: a cobertura de coleta existente abrange 5.567 hectares, enquanto a área simulada atinge 5.686 hectares, representando um aumento de aproximadamente 2,1%. No caso do tratamento de esgoto, a cobertura existente ocupa 2.910 hectares, em comparação com 3.203 hectares da cobertura simulada, indicando uma diferença de cerca de 10,1%

Este fator corrobora a seguir os valores percentuais de probabilidade de mudança de classe de 2016 para 2024, conforme matriz de transição potencial emitida pelo LCM: a) 100% de área coletada para área coletada, b) 0% de área coletada para área não coletada, c)

4,47% de área não coletada para área coletada e d) 95,53% de área não coletada para área não coletada. Agora para tratamento, temos: a) 99,56% de área tratada para área tratada; b) 0,44% de área tratada para área não tratada, c) 6,12% de área não tratada para área tratada e d) 93,88% de área não tratada para área não tratada.

Pela Figura 43, observa-se que o modelo conseguiu replicar parcialmente a cobertura existente. As coberturas de coleta e tratamento simuladas se concentram em regiões similares às áreas reais, especialmente nas áreas urbanas consolidadas da bacia, o que demonstra um alinhamento geral entre a simulação e a realidade. Entretanto, diferenças são notáveis em algumas regiões. No mapa da simulação, áreas simuladas de coleta e tratamento aparecem em locais onde não há cobertura existente, indicando possíveis estimativas exageradas do modelo em relação à infraestrutura projetada.

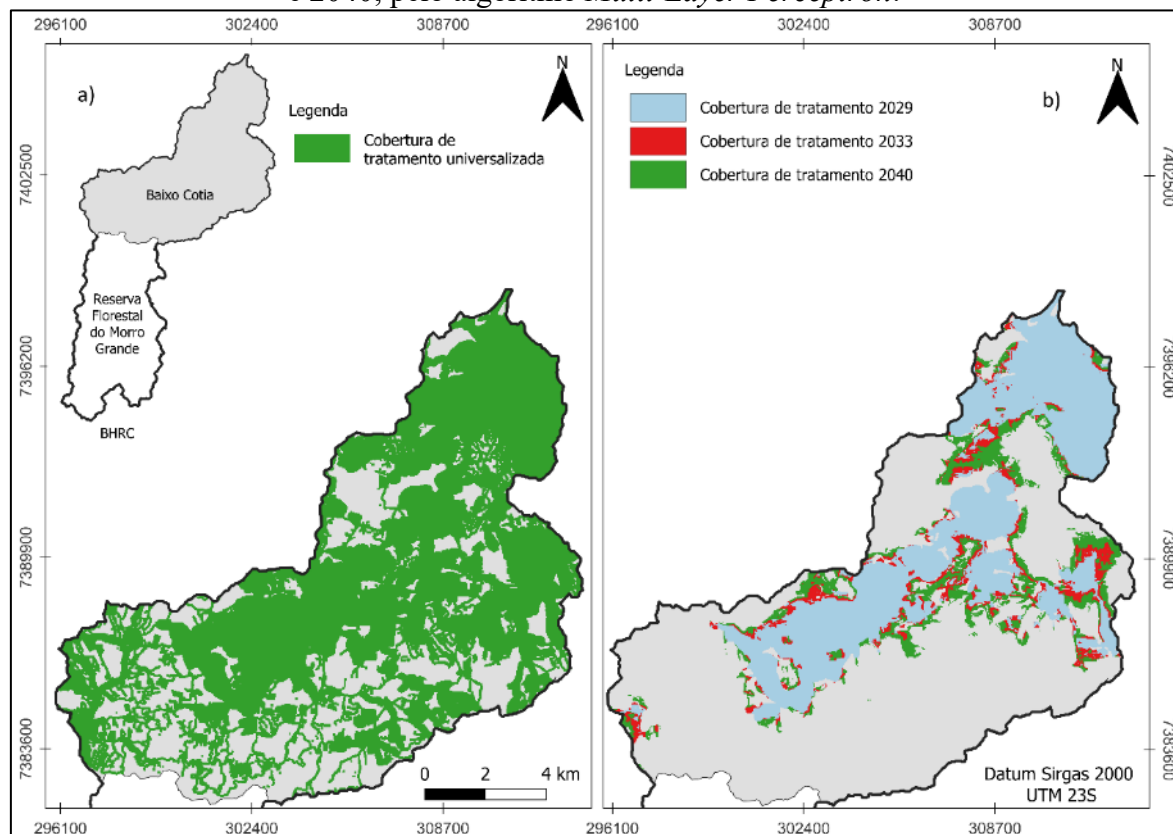
Além disso, o comportamento observado nas coberturas de tratamento sugere que o modelo prioriza zonas mais próximas às Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs), enquanto coberturas de coleta apresentam maior abrangência em relação às redes existentes. Essa diferença reflete uma lógica do modelo que associa a infraestrutura de tratamento a pontos centrais da bacia, enquanto a coleta é mais dispersa.

Ainda, ao analisar a Figura 43, nota-se uma limitação na simulação da cobertura de tratamento: o modelo não consegue identificar adequadamente os trechos estreitos que conectam polígonos maiores. Esses trechos correspondem aos coletores-tronco e interceptores, responsáveis por conduzir o esgoto a ETE Barueri, seguindo o curso do Rio Cotia na bacia. Essa limitação provavelmente está associada à resolução espacial adotada na metodologia, de 30 metros. Como consequência, a cobertura simulada apresenta uma falsa impressão de desconexão entre áreas, sugerindo equivocadamente que essas áreas isoladas possuem sistemas de tratamento independentes.

Portanto, a estimativa de quantidade de mudança para 2024, aponta que para um período de oito anos, a tendência das classes de coleta e tratamento é maior para persistência do que para mudança, a despeito do crescimento progressivo para anos posteriores. Este resultado é semelhante com os resultados dos trabalhos de Luiz (2014) e Pavão (2017) que simularam mudanças de uso do solo na Bacia do Rio Piracicaba e no Parque Estadual da Cantareira (SP), respectivamente.

A Figura 44 apresenta o mapa de comparação entre a cobertura de coleta universalizada com a cobertura simulada dos anos de 2029, 2033 e 2040 pelo modelo de MLP.

Figura 44. Mapa da evolução da cobertura de coleta simulada para os anos de 2029, 2033 e 2040, pelo algoritmo *Multi-Layer Perceptron*.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 44a apresenta a cobertura universalizada de coleta, representando o cenário ideal no qual todas as unidades da BHRC estão atendidas. Na Figura 44b é exibida a evolução da cobertura de coleta simulada para os anos de 2029 (azul-claro), 2033 (vermelho) e 2040 (verde), conforme previsto pelo modelo MLP.

A análise revela um progresso contínuo na expansão da cobertura de coleta ao longo dos anos simulados, aproximando-se gradualmente da cobertura universalizada. Em 2029, observa-se uma distribuição limitada das áreas simuladas, concentradas principalmente nas regiões centrais e de maior densidade populacional. Este padrão reflete uma priorização nas áreas com maior viabilidade técnica e econômica para implantação das redes.

Para 2033, a área simulada expande-se de forma significativa, alcançando áreas periféricas e regiões com menor densidade populacional. No entanto, ainda existem lacunas,

especialmente em zonas de transição entre áreas urbanas e rurais, o que demonstra os desafios técnicos e econômicos da universalização nestas áreas.

Em 2040, as áreas simuladas mostram uma maior coincidência com a cobertura universalizada. A ampliação das áreas simuladas nesta etapa sugere que o modelo MLP conseguiu capturar a lógica de crescimento progressivo das redes de coleta, priorizando as áreas adjacentes à infraestrutura existente e seguindo um padrão espacial mais conectado.

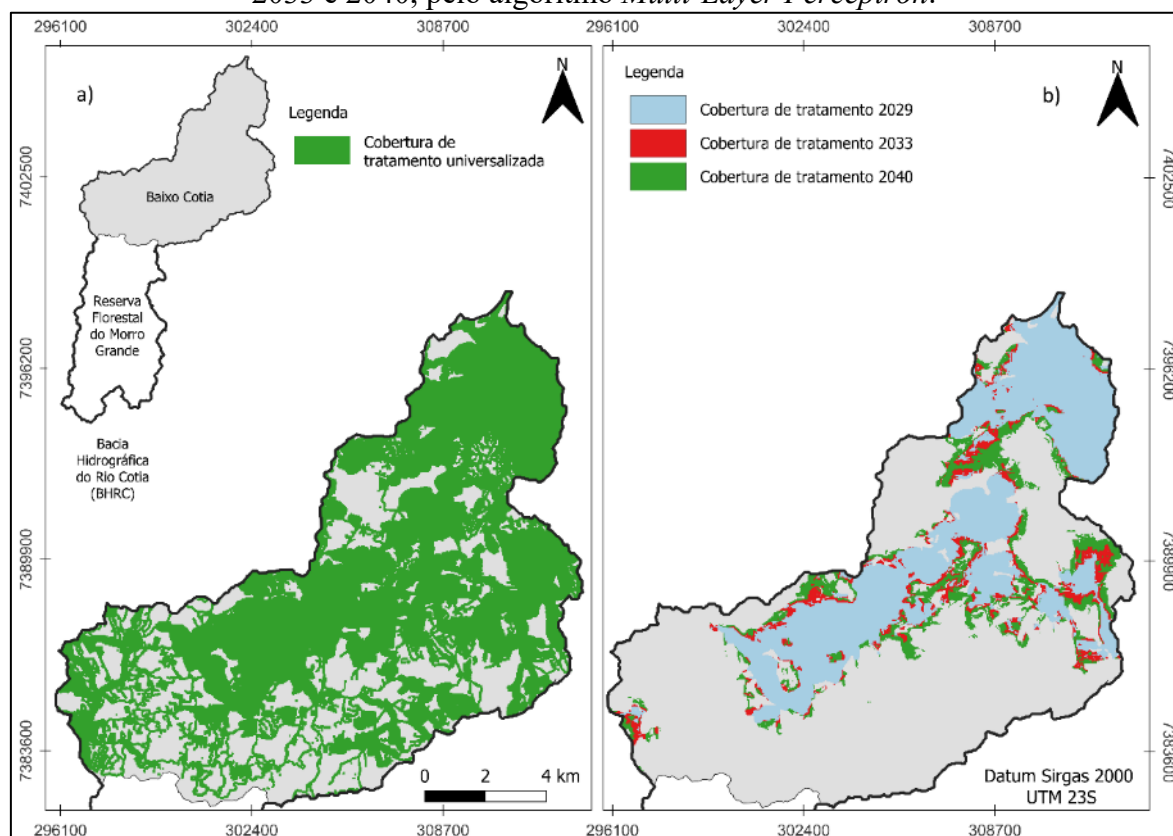
Comparativamente, as áreas simuladas para 2040 ainda apresentam pequenas discrepâncias em relação à cobertura universalizada, com regiões onde a expansão das redes de coleta não foi prevista pelo modelo. Essas diferenças podem ser associadas a limitações do modelo MLP em capturar condições específicas ou à necessidade de melhorias nas variáveis explanatórias utilizadas.

De maneira geral, o comportamento do modelo demonstra uma forte aderência ao conceito de cobertura universalizada, especialmente a partir de 2033 e 2040. Essa evolução progressiva das coberturas de coleta simuladas destaca a capacidade do modelo MLP em representar, de maneira confiável, o avanço da infraestrutura na BHRC. No entanto, ajustes futuros podem ser necessários para minimizar as discrepâncias e aproximar ainda mais os resultados simulados do cenário idealizado.

Para predições que usam autômatos celulares combinados a cadeias de Markov, a literatura salienta que a qualidade das projeções é sensível à qualidade dos mapas de referência e às probabilidades de transição inferidas. Réplicas e adaptações devem reproduzir o mesmo intervalo temporal da calibração e validar com tabulação cruzada – acertos, erros e alarmes falsos – antes de extrapolar cenários para horizontes futuros, prática adotada e discutida em estudos com dados de uso e Ocupação do solo no distrito de Jhelum, Punjab, Paquistão (AFTAB et al., 2024).

A Figura 45 apresenta o mapa de comparação entre a cobertura de tratamento universalizada com a cobertura simulada dos anos de 2029, 2033 e 2040 pelo modelo de MLP.

Figura 45. Mapa da evolução da cobertura de tratamento simulada para os anos de 2029, 2033 e 2040, pelo algoritmo *Multi-Layer Perceptron*.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 45 apresenta uma comparação entre a cobertura universalizada (45a) de tratamento de esgoto e as áreas simuladas de tratamento para os anos de 2029, 2033 e 2040 (45b), com base no modelo MLP.

Na Figura 44a, a cobertura universalizada representa a situação ideal onde todos os domicílios da BHRC têm acesso ao sistema de coleta e tratamento de esgoto. Já à direita, os mapas ilustram a evolução das áreas simuladas de tratamento em diferentes anos, destacando o avanço gradativo no atendimento das metas.

A Figura 45b evidencia que as áreas em azul (2029), vermelho (2033) e verde (2040) mostram a expansão do sistema de tratamento, revelando uma priorização inicial nas regiões mais urbanizadas e densamente ocupadas. Essa priorização reflete a estratégia de atender primeiro locais com maior impacto socioambiental e demanda populacional. No entanto, é perceptível que as áreas mais periféricas, geralmente de maior densidade populacional ou de características periurbanas, apresentam uma cobertura inferior, mesmo em 2040. Essa situação ressalta as dificuldades em levar infraestrutura adequada a essas regiões, seja por limitações técnicas, financeiras ou logísticas.

Analisando a Figura 45, ao comparar as áreas simuladas com a área universalizada, observa-se que, embora a expansão até 2040 cubra boa parte da demanda, ainda há regiões significativas não atendidas que exigem planejamento e esforços adicionais para alcançar a meta de universalização. A área verde, correspondente ao ano de 2040, está mais próxima de coincidir com a área universalizada, mas lacunas em áreas periféricas indicam que a meta completa ainda não será plenamente alcançada até essa data.

Por fim a Figura 45 indica a necessidade de ajustes no planejamento das redes de coleta e tratamento, com foco especial nas áreas rurais e em comunidades isoladas, que são mais difíceis de integrar ao sistema. O avanço gradual também reflete os desafios associados à implementação de grandes projetos de infraestrutura, incluindo restrições orçamentárias e a complexidade de execução de obras em terrenos variados. Essa análise destaca a importância de considerar tanto aspectos técnicos quanto sociais na busca pela universalização do tratamento de esgoto na BHRC.

A Tabela 18 apresenta os valores em hectares das coberturas simuladas.

Tabela 18. Valor das áreas simuladas em hectare.

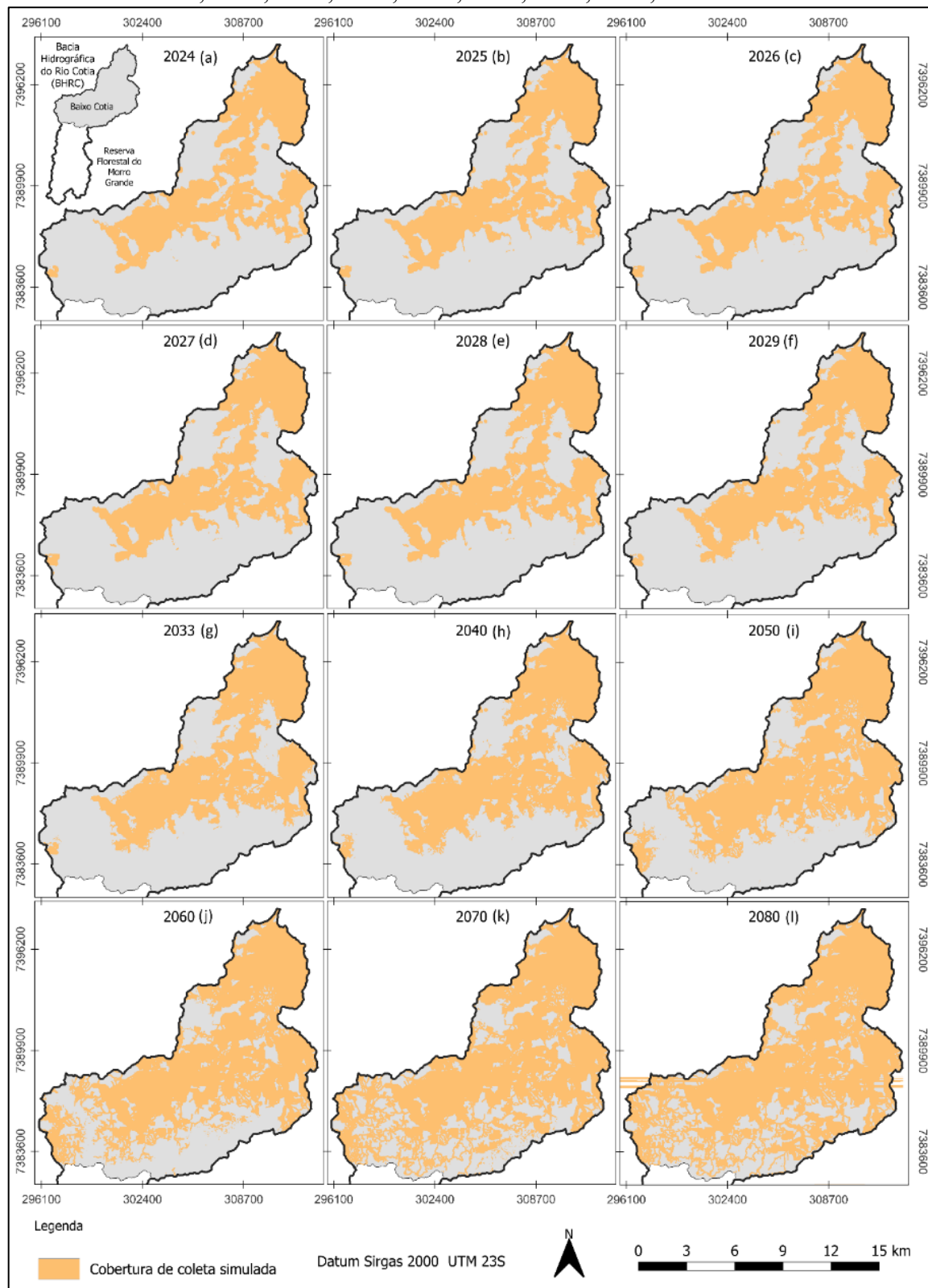
Ano	Coleta (ha)	Tratamento (ha)	Proporção Coleta x Tratamento
2024	5.567,29	2.909,55	1,91
2025	5.797,71	3.375,90	1,72
2026	5.908,77	3.549,06	1,66
2027	6.019,47	3.719,70	1,62
2028	6.129,45	3.888,90	1,58
2029	6.238,89	4.056,84	1,54
2033	6.670,35	4.714,20	1,41
2040	7.402,05	5.812,20	1,27
2050	8.397,63	7.271,46	1,15
2060	9.338,04	8.612,19	1,08
2070	10.226,16	9.844,11	1,04
2080	10.635,03	10.726,11	0,99

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 18 evidencia a redução progressiva da diferença entre as áreas simuladas de coleta e tratamento ao longo do horizonte temporal, refletida na diminuição contínua da proporção Coleta/Tratamento. Observa-se que, a partir de 2050, essa razão se aproxima da unidade, alcançando em 2080 um valor praticamente 1:1, o que indica convergência entre as coberturas simuladas e sugere a consolidação da universalização do tratamento em patamar equivalente ao da coleta.

A Figura 46 apresenta o mapa de comparação das coberturas simuladas de coleta de esgoto para o ano de 2024 a 2080.

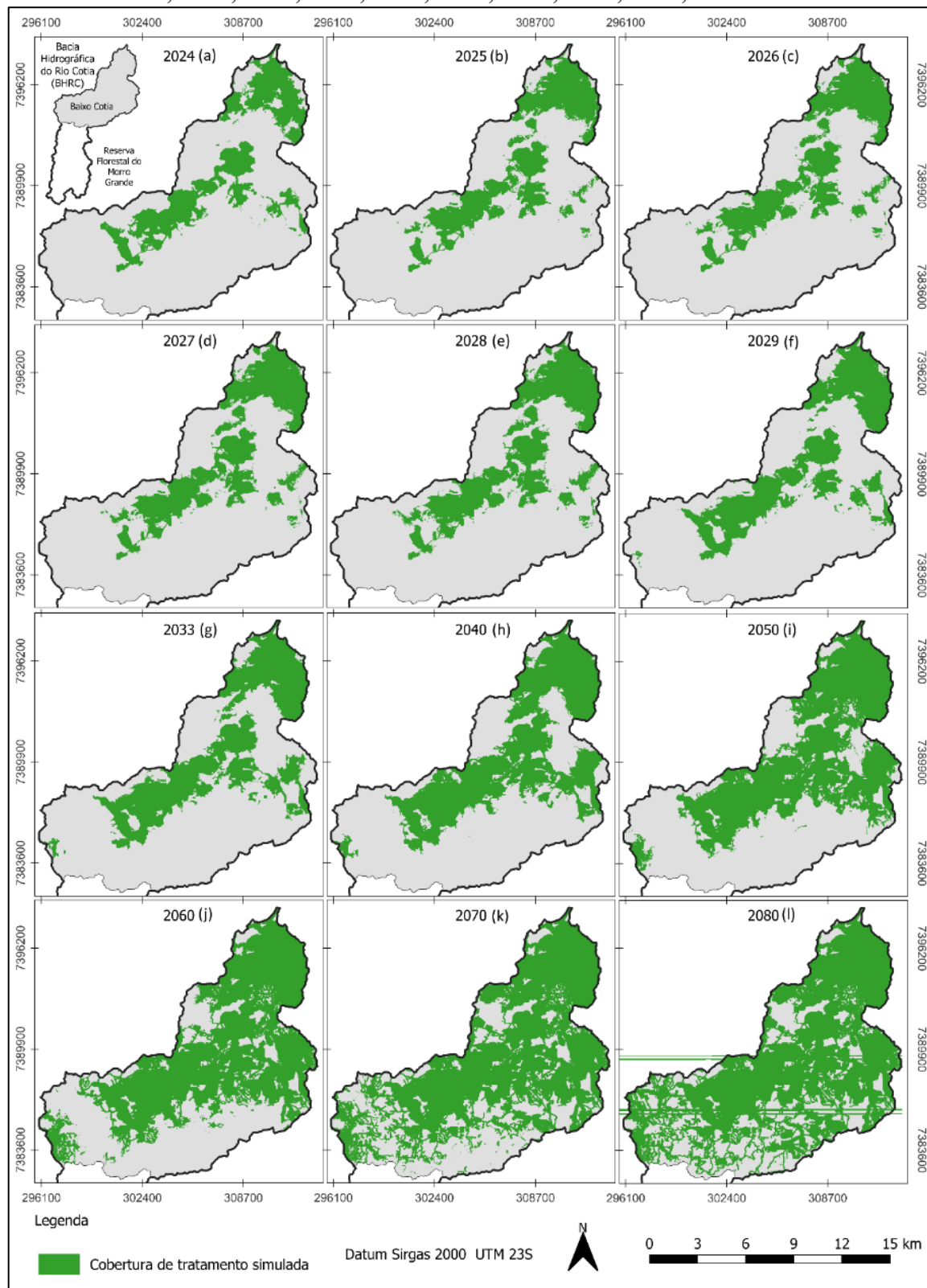
Figura 46. Mapa da evolução da cobertura de coleta simulada para os anos de 2024, 2025, 2026, 2027, 2028, 2029, 2033, 2040, 2050, 2060, 2070 e 2080.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 47 apresenta o mapa de comparação das coberturas simuladas de tratamento de esgoto para o ano de 2024 a 2080.

Figura 47. Mapa da evolução da cobertura de tratamento simulada para os anos de 2024, 2025, 2026, 2027, 2028, 2029, 2033, 2040, 2050, 2060, 2070 e 2080.



Fonte: Autoria própria.

A análise dos mapas apresentados nas Figuras 46 e 47 em conjunto com a Tabela 18 evidencia a progressão das áreas simuladas de coleta e tratamento de esgoto na BHRC ao longo do período de 2024 a 2080.

Nos mapas das Figuras 46 e 47, observa-se a evolução espacial dessas coberturas simuladas. No início do período analisado, tanto as coberturas de coleta quanto as de tratamento estão concentradas em regiões específicas da bacia, refletindo o estágio inicial de infraestrutura existente. Com o passar dos anos, essas áreas expandem-se para regiões mais periféricas, especialmente a partir de 2033, com um avanço notável nas áreas rurais, que apresentam maior defasagem na cobertura.

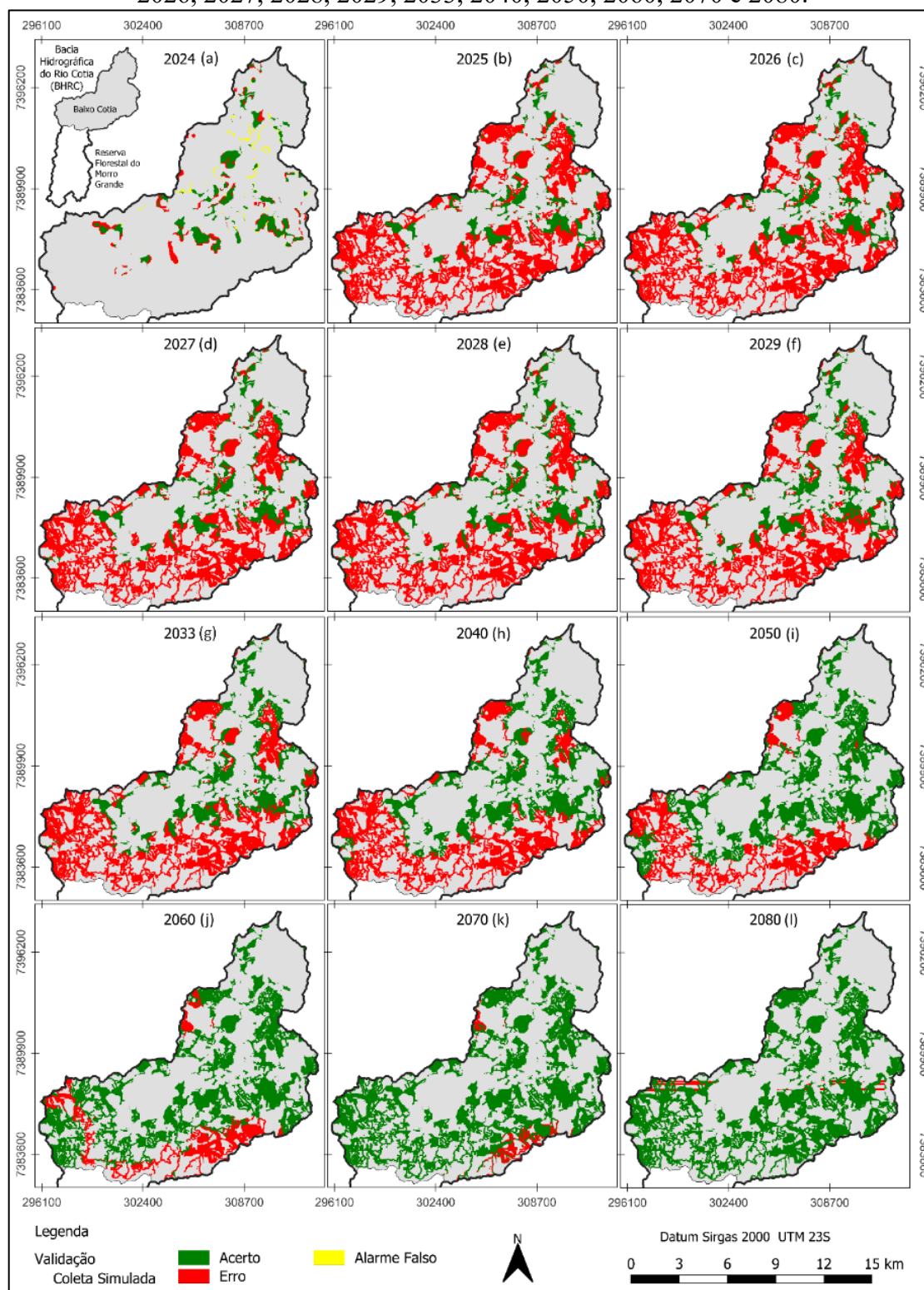
A análise espacial das coberturas de coleta (Figura 46) destaca que a expansão tende a seguir as principais vias urbanas e áreas de maior densidade populacional, com uma cobertura mais uniforme e conectada em áreas formais e urbanizadas. Já na Figura 47, as coberturas de tratamento apresentam expansão mais fragmentada, com integração progressiva às redes existentes. Esse comportamento reforça a importância da sinergia entre coleta e tratamento para alcançar a universalização (SILVA 2022a).

A integração dessas informações demonstra que as áreas simuladas estão alinhadas com os planos de universalização e atendem ao crescimento projetado da infraestrutura. No entanto, as regiões mais remotas, especialmente áreas rurais e informais, ainda requerem maior atenção para garantir a cobertura uniforme e alcançar os objetivos de universalização do SES na bacia. A análise quantitativa da Tabela 18 e a espacial das Figuras mostram como o planejamento eficiente e os investimentos direcionados podem equilibrar o avanço da coleta e tratamento na bacia (ZILIOTTO, 2024).

As linhas horizontais que aparecem fora da área de estudo, observadas inicialmente na Figura 41b, voltam a surgir nas projeções para o ano de 2080 apresentadas nas Figuras 46l e 47l. Esse efeito não corresponde a uma situação real do território, mas indica que o modelo perde precisão quando projetado para um futuro muito distante. Estudos que utilizam Cadeias de Markov mostram que, em projeções muito longas, os resultados passam a refletir mais o funcionamento interno do modelo e da malha de cálculo do que os processos reais observados no espaço, devido ao acúmulo de incertezas ao longo do tempo (GASIRABO et al., 2023).

As Figuras 48 e 49 apresentam os mapas de validação para as áreas simuladas respectivamente para coleta e tratamento, em função do mapa de referência que é a cobertura universalizada do SES (Figura 4).

Figura 48. Mapa da validação da cobertura de coleta simulada para os anos de 2024, 2025, 2026, 2027, 2028, 2029, 2033, 2040, 2050, 2060, 2070 e 2080.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 48 apresenta os mapas de validação das áreas simuladas de coleta para os anos de 2024 a 2080, destacando as três categorias de validação: acerto (verde), erro (vermelho) e alarme falso (amarelo). Ao longo do tempo, é possível observar uma evolução significativa na precisão do modelo.

Nos primeiros anos, especialmente em 2024 (Figura 48a), há uma predominância de áreas classificadas como erro (vermelho), indicando que o modelo previu persistência em áreas onde, na verdade, ocorreram alterações. Além disso, existem áreas de alarme falso (amarelo), representando previsões de alteração em locais onde houve persistência, embora com menor frequência. As áreas de acerto (verde), que representam previsões corretas de alteração, estão dispersas e ainda não dominam o cenário.

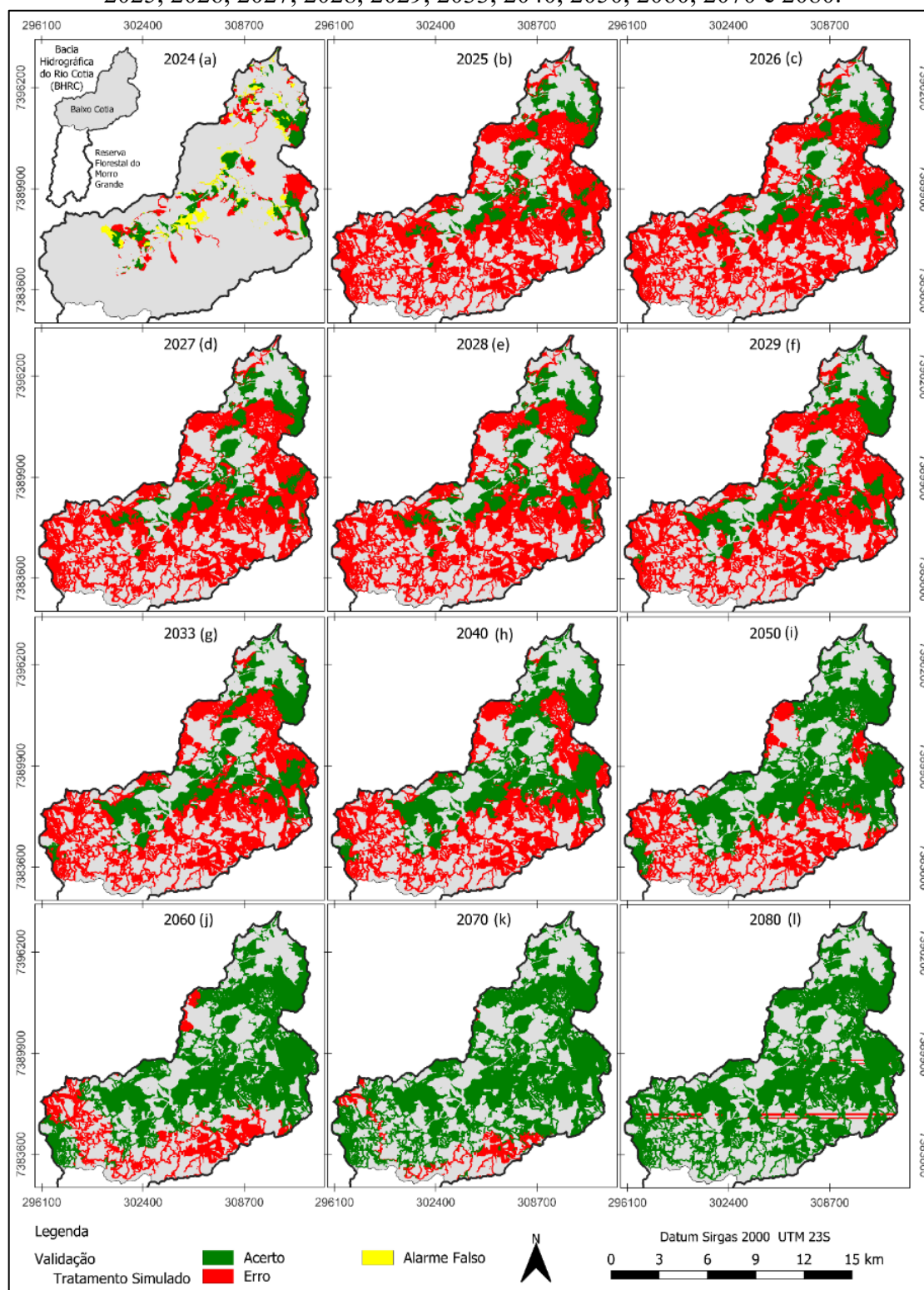
Conforme os anos avançam, especialmente a partir de 2040 (Figura 48h), nota-se um aumento significativo nas áreas classificadas como acerto (verde), indicando maior precisão do modelo em prever corretamente as alterações. Simultaneamente, as áreas de erro (vermelho) começam a reduzir de forma consistente, especialmente nas bordas das áreas urbanas e em regiões mais próximas das infraestruturas existentes. Os alarmes falsos (amarelo), que já são pouco frequentes, desaparecem por completo já em 2025 (Figura 48b).

No longo prazo, em 2070 e 2080 (Figuras 48k e 48l), praticamente toda a área simulada é validada como acerto (verde), evidenciando que o modelo atinge alta precisão ao prever as alterações previstas para a universalização do sistema de coleta. Essa evolução destaca a eficiência crescente do modelo em capturar os padrões de expansão da cobertura de coleta.

Além disso, a análise espacial dos mapas de validação destaca que as áreas de erro (vermelho) nos primeiros anos estão frequentemente localizadas em zonas periféricas ou de transição, onde a dinâmica de ocupação e a expansão da infraestrutura de coleta são mais complexas de prever. A redução progressiva dessas áreas de erro ao longo do tempo sugere que o modelo é capaz de capturar gradualmente a consolidação da infraestrutura nessas localidades, alinhando-se com as metas de universalização (SILVA, 2022a; VARNIER, 2024).

A análise também sugere que as áreas inicialmente classificadas como erro estão concentradas em regiões de transição entre zonas urbanas e rurais, onde as alterações são mais incertas. Esses resultados reforçam a importância de ajustes no modelo para melhorar a previsão de longo prazo, especialmente em áreas de maior complexidade territorial.

Figura 49. Mapa da validação da cobertura de tratamento simulada para os anos de 2024, 2025, 2026, 2027, 2028, 2029, 2033, 2040, 2050, 2060, 2070 e 2080.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 49, que apresenta os mapas de validação da cobertura de tratamento simulada, apresenta um comportamento muito semelhante ao observado na Figura 48 para a coleta simulada, mas com uma incidência levemente maior de erros. Assim como na coleta,

as áreas de erro (vermelho) predominam nos primeiros anos, especialmente em 2024 (Figura 49a), indicando que o modelo teve dificuldade em prever corretamente as alterações iniciais relacionadas à expansão da cobertura de tratamento. As áreas de alarme falso (amarelo), que representam previsões de alteração em locais onde houve persistência, também desaparecem por completo a partir de 2025 (Figura 49b).

Ao longo do tempo, especialmente a partir de 2040 (Figura 49h), observa-se uma melhora significativa na validação do modelo, com aumento consistente das áreas classificadas como acerto (verde) e redução progressiva das áreas de erro. Essa evolução reflete a capacidade do modelo em se ajustar às dinâmicas de implantação das infraestruturas de tratamento, particularmente nas proximidades das ETEs existentes ou previstas. Em 2060 (Figura 49j), os acertos tornam-se predominantes em praticamente toda a área da bacia, enquanto os erros residuais estão concentrados em regiões de transição entre zonas urbanas e rurais, áreas que geralmente apresentam maior complexidade para previsão.

No longo prazo, para o ano de 2080 (Figura 49l), o modelo apresenta elevada precisão, com a maior parte da área validada como acerto, sendo os principais erros associados às anomalias representadas por linhas horizontais. Apesar desse desempenho positivo, o resultado ligeiramente inferior em relação à coleta indica que o modelo de tratamento ainda demanda maior refinamento para representar adequadamente as particularidades do sistema de tratamento de esgoto, especialmente nos anos iniciais da simulação.

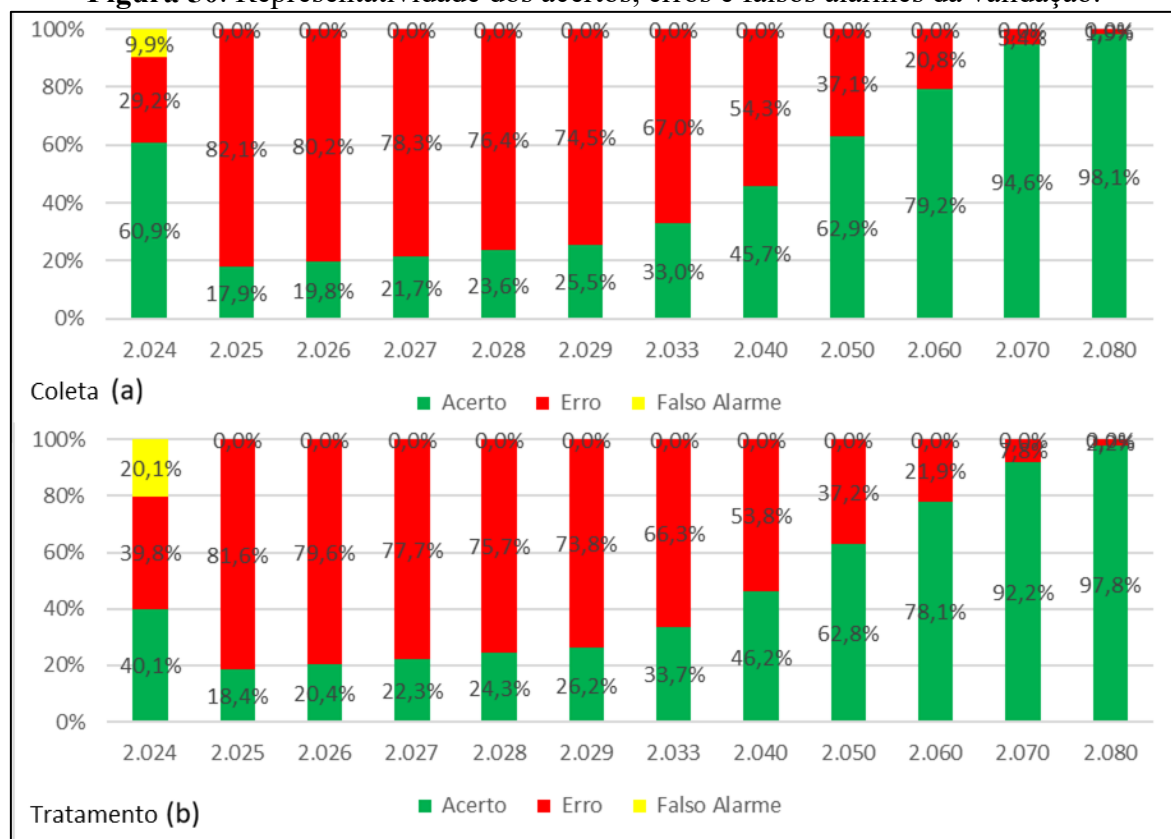
As Figuras 48 e 49 indicam que as simulações de coleta e tratamento são robustas e alinhadas às metas de universalização, inclusive para 2080. A anomalia das linhas horizontais, contudo, representa uma limitação da modelagem em projeções de longo prazo e não um processo real do território, sem comprometer a utilidade dos resultados para o planejamento da expansão da cobertura.

Os resultados apresentados indicam que a aplicação de modelagem espacial ao processo de universalização do esgotamento sanitário representa um avanço conceitual e metodológico, ao permitir a projeção territorial da expansão sob a ótica operacional da concessionária. Essa abordagem evidencia o potencial do uso de técnicas preditivas para subsidiar o planejamento do saneamento, especialmente em contextos em que a infraestrutura e a gestão são determinantes para o alcance das metas de cobertura. Ao mesmo tempo, o ineditismo da pesquisa ressalta a necessidade de ampliar futuras investigações que

integrem dimensões socioeconômicas, institucionais e populacionais, complementando a visão técnico-operacional aqui adotada.

A Figura 50 apresenta a representatividade da validação das coberturas simuladas para coleta e tratamento.

Figura 50. Representatividade dos acertos, erros e falsos alarmes da validação.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 50 apresenta a validação das coberturas simuladas para o SES em função da cobertura universalizada (Figura 4), tanto para coleta quanto para tratamento, avaliando a qualidade das previsões realizadas pelo modelo em relação à cobertura existente. A validação é baseada em três categorias: acerto, que representa as situações em que o modelo previu alteração e houve alteração; erro, que ocorre quando o modelo previu persistência, mas houve alteração; e alarme falso, que se refere a previsões de alteração onde houve persistência.

Para a coleta (Figura 50a), o percentual de acertos é de 60,9% em 2024, indicando que o modelo conseguiu prever corretamente as alterações em mais da metade dos casos observados no início do período. Esse valor aumenta progressivamente ao longo do tempo, atingindo 98,1% em 2080, o que demonstra uma melhora significativa na precisão do modelo

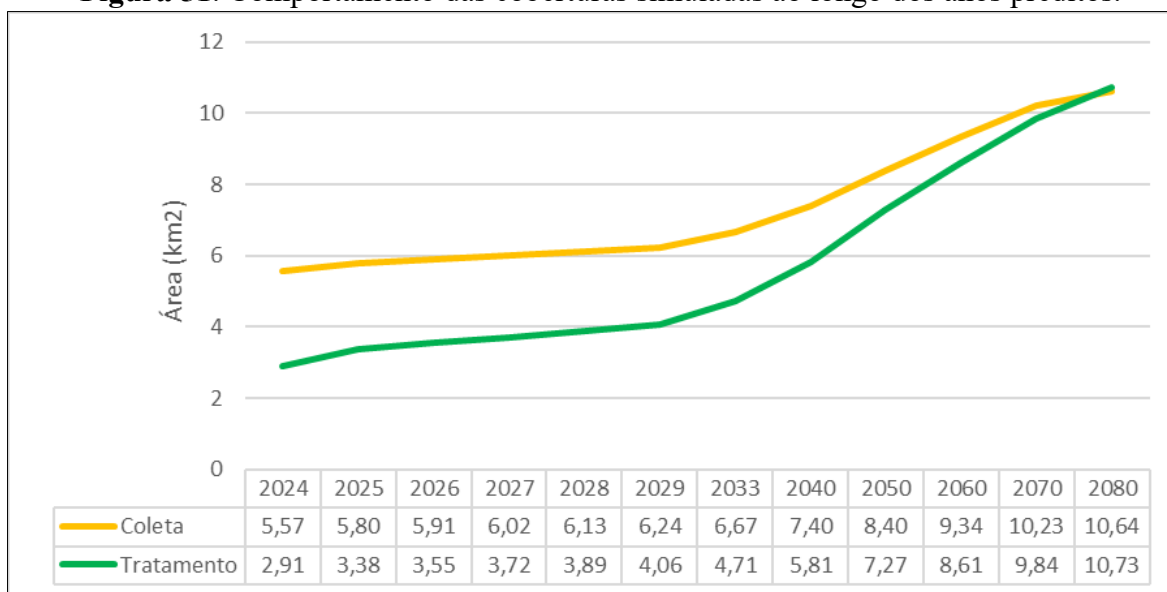
para prever mudanças. Os erros, que representam os casos em que o modelo previu persistência, mas houve alteração, começam em 29,2% em 2024 e diminuem constantemente até desaparecer completamente em 2070. Os alarmes falsos, que indicam previsões de alteração onde houve persistência, aparecem somente como 9,9% em 2024, mas desaparecem já em 2025, evidenciando um rápido ajuste do modelo no início do período.

Para o tratamento (Figura 50b), observa-se comportamento semelhante ao da coleta, com acertos iniciando em 40,1% em 2024 e evoluindo de forma contínua até 97,8% em 2080. Os erros, inicialmente em 39,8%, reduzem-se progressivamente até desaparecerem em 2070, enquanto os alarmes falsos, que partem de 20,1% em 2024, deixam de ocorrer já em 2025. Esses resultados reforçam a alta precisão temporal do modelo também para a cobertura de tratamento.

A validação das coberturas simuladas confirma o aprimoramento do modelo ao longo do tempo, com maior precisão no médio e longo prazo. Os percentuais mais elevados de erro em 2024 decorrem do uso da cobertura existente na validação inicial. No geral, os resultados evidenciam a consistência do modelo e sua eficácia em apoiar o planejamento rumo à universalização do SES na BHRC.

A Figura 51 mostra a evolução das coberturas de coleta e tratamento de esgoto entre 2024 e 2080, indicando uma tendência de crescimento contínuo para ambas as coberturas.

Figura 51. Comportamento das coberturas simuladas ao longo dos anos preditos.



Fonte: Autoria própria.

Analisando a Figura 51, verifica-se que em 2024, a cobertura de coleta inicia em 5,57 km², quase o dobro da cobertura de tratamento, que começa com 2,91 km². Até 2029, o aumento é gradual, chegando a 6,24 km² para coleta e 4,06 km² para tratamento. A partir de 2033, observa-se uma aceleração mais significativa, especialmente no tratamento, que passa de 4,71 km² em 2033 para 8,61 km² em 2060, enquanto a coleta atinge 9,34 km² no mesmo ano. No período final, entre 2070 e 2080, ocorre a convergência das duas linhas, com o tratamento superando levemente a coleta, alcançando 10,73 km² contra 10,64 km², evidenciando uma tendência de universalização do tratamento e redução da diferença histórica entre as duas coberturas.

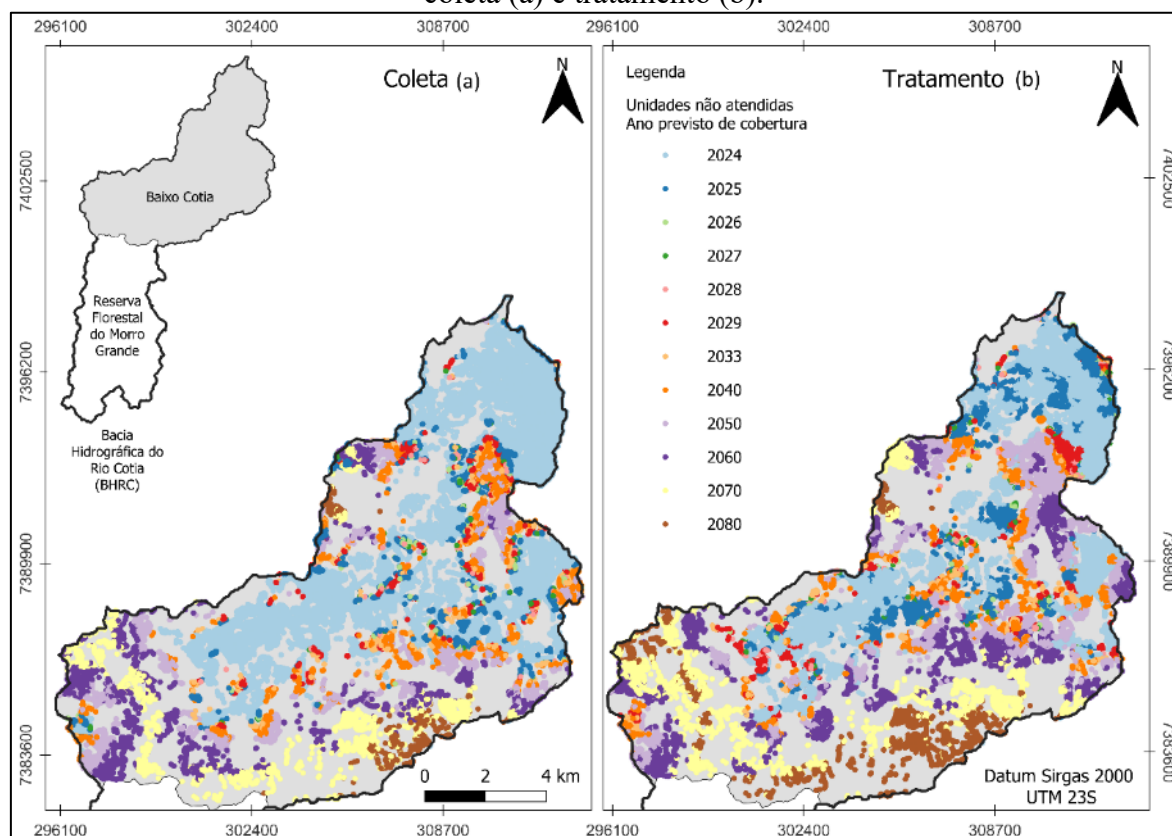
Os resultados obtidos até aqui demonstram que a modelagem espacial aplicada é capaz de representar a tendência de expansão dos sistemas de coleta e tratamento de esgoto na BHRC. Observa-se que as áreas com maior adensamento urbano e infraestrutura consolidada apresentam maior probabilidade de cobertura, enquanto as regiões periféricas e de menor densidade populacional permanecem com menor potencial de cobertura (MOURA et al., 2025).

Essa diferenciação espacial reflete o comportamento histórico de expansão dos sistemas e as limitações estruturais associadas à topografia, à disponibilidade de rede e à complexidade operacional. Embora o modelo represente a universalização sob a ótica operacional da concessionária, é importante reconhecer que o crescimento urbano exerce influência indireta sobre a expansão do saneamento (SILVA et al., 2023b; ROSSI, 2024).

De acordo com Toniolo et al. (2024a), a dinâmica de ocupação do território, a formação de novos vetores habitacionais e a densificação de áreas já atendidas alteram a demanda e a priorização de investimentos em infraestrutura. Esses processos, ainda que não tenham sido incorporados diretamente às variáveis do modelo, condicionam a efetiva ampliação do atendimento e devem ser considerados em análises futuras que integrem aspectos demográficos e urbanísticos à abordagem técnico-operacional aqui adotada (VERBUG et al., 2002; SALVADOR e ARENALES, 2022).

No que se refere às unidades não atendidas — domicílios do IBGE e ligações TL 0 da Sabesp, com apenas conexão de água —, a Figura 52 apresenta essas unidades classificadas de acordo com o ano previsto de cobertura.

Figura 52. Mapa de previsão de cobertura de esgotamento das unidades não atendidas para coleta (a) e tratamento (b).



Fonte: Autoria própria.

Conforme apresenta a Figura 52, existem 83.273 unidades não atendidas na BHRC, de forma que a análise espacial evidencia uma priorização temporal nas áreas mais urbanizadas e centrais do Baixo Cotia, com a maior parte das unidades previstas para serem atendidas entre os anos de 2024 e 2029. Essas áreas estão representadas predominantemente nas cores azul-claro e azul-escuro, o que reflete a tendência de cobertura inicial em regiões já parcialmente atendidas ou próximas à infraestrutura existente.

Na presente análise, utiliza-se o conceito de unidades não atendidas, definido como os domicílios particulares do IBGE e as ligações com conexão à rede de água da Sabesp (TL 0), totalizando 83.273 unidades. Ressalta-se, contudo, que esse montante não corresponde ao total de imóveis a serem cobertos, pois ambas as referências representam a mesma edificação sob perspectivas distintas. As camadas vetoriais do IBGE e da Sabesp são bases diferentes e, portanto, complementares, não cumulativas. Assim, não é possível somar os valores, uma vez que isso geraria duplicidade; na prática, a quantidade real de unidades não atendida está dividida da seguinte forma: 59.672 ligações de água e 23.601 domicílios particulares.

A Figura 52a aponta que a expansão da cobertura de coleta ocorre de forma mais ampla e antecipada em concordância com a lógica operacional do SES, isto é, primeiro o efluente é coletado e depois tratado. No entanto, pelo SIG notou-se que uma pequena porcentagem das unidades não atendidas, 1.654 (o que equivale a aproximadamente 2% do total), apresentou uma discrepância na simulação: a cobertura de tratamento prevista antes da coleta. Isto caracteriza-se como uma restrição da modelagem, embora essa situação não reflita a sequência lógica de funcionamento do sistema, sua ocorrência é limitada e considerada aceitável dentro do contexto da modelagem e da complexidade do cenário.

Ainda analisando a Figura 52b, as áreas previstas para cobertura após 2033, em especial nos horizontes de 2040, 2060 e 2080, estão localizadas predominantemente em regiões periféricas ou de menor densidade urbana. Isso reflete os desafios técnicos e logísticos para a universalização em áreas mais afastadas ou de difícil acesso, reforçando a necessidade de investimentos e planejamento de longo prazo. Ainda assim, a similaridade espacial entre as previsões de coleta e tratamento é alta, indicando que o modelo é robusto para identificar padrões de expansão espacial.

A Tabela 19 apresenta a quantidade de unidades não atendidas por ano previsto de cobertura.

Tabela 19. Quantidade de unidades não atendidas classificadas por ano previsto de cobertura de esgotamento sanitário.

Ano	Contagem		Acumulado	
	Coleta	Tratamento	Coleta	Tratamento
2024	44.270	25.986	44.270	25.986
2025	6.844	10.930	51.114	36.916
2026	727	674	51.841	37.590
2027	610	674	52.451	38.264
2028	687	886	53.138	39.150
2029	1.664	4.383	54.802	43.533
2033	1.924	2.318	56.726	45.851
2040	4.736	5.252	61.462	51.103
2050	8.857	9.749	70.319	60.852
2060	6.303	10.524	76.622	71.376
2070	5.748	8.306	82.370	79.682
2080	903	3.591	83.273	83.273

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 19 revela um planejamento progressivo e estruturado para a universalização do esgotamento sanitário, com destaque para o atendimento prioritário no médio prazo e uma distribuição gradual a longo prazo. Em 2024, observa-se a maior concentração de

unidades não atendidas, com 44.270 unidades previstas para cobertura de coleta e 25.986 para tratamento, refletindo um esforço inicial em áreas mais urbanizadas e próximas à infraestrutura existente. Em 2025, o avanço continua com 6.844 unidades previstas para coleta e 10.930 para tratamento, demonstrando a consolidação dos serviços na região.

Ainda analisando a Tabela 19, verifica-se que no médio prazo, entre 2026 e 2029, há uma redução progressiva no número de unidades não atendidas, indicando que as ações de universalização começam a atingir áreas menos densas ou de menor prioridade inicial. Em 2029, por exemplo, estão previstas 1.664 unidades para coleta e 4.383 para tratamento. A partir de 2033, os esforços se concentram principalmente em regiões periféricas e de difícil acesso, resultando em um atendimento mais espaçado ao longo do tempo. Em 2060, o número de unidades atendidas permanece significativo, com 6.303 previstas para coleta e 10.524 para tratamento. Até 2080, o modelo prevê 903 unidades atendidas na coleta e 3.591 no tratamento, indicando o atendimento das áreas mais remotas e de menor densidade populacional.

A Tabela 20 apresenta a quantidade de empreendimentos imobiliários por ano previsto de cobertura, de forma que estes exercem um papel crucial no crescimento demográfico da BHRC em função do efeito da verticalização das edificações, aumentando o consumo de água e, por consequência, o volume de esgoto coletado (SABESP, 2025).

Tabela 20. Quantidade de empreendimentos imobiliários não atendidos classificados por ano previsto de cobertura de esgotamento sanitário.

Ano	Qtd.	Coleta		Qtd.	Tratamento	
		População Prevista	Vazão esgoto (L/s)		População Prevista	Vazão esgoto (L/s)
2024	122	26.040	200,97	52	10.906	99,25
2025	21	3.722	21,89	19	3.683	14,14
2026	1	133	2,79	4	1.643	12,76
2027	5	1.086	4,74	7	1.068	11,72
2028	5	3.020	12,68	4	1.176	6,20
2029	16	4.945	31,39	19	5.644	42,95
2033	16	4.555	17,75	76	18.742	101,10
2040	38	17.214	80,88	18	6.753	25,37
2050	46	21.999	106,69	20	7.301	41,93
2060	26	27.404	98,26	54	37.311	158,57
2070	17	14.910	49,34	33	27.104	102,87
2080	23	30.789	105,22	30	34.485	115,75
Total	336	155.816	732,60	336	155.816	732,60

Fonte: Autoria própria.

Segundo a Tabela 20 existem um total de 336 empreendimentos imobiliários que necessitam de cobertura, sendo 126 unidades que já estão habitados e atendidos somente por fornecimento de água (37,5%) e 210 unidades a serem implantados, isto é, em fase de projeto ou em construção (62,5%).

A Tabela 20 apresenta uma média anual de incremento de seis empreendimentos, correspondendo a aproximadamente 2.780 pessoas e uma vazão agregada de 13,6 L/s. Em relação à quantidade de empreendimentos (Tabela 20), observa-se um aumento gradual ao longo do tempo. No início, em 2024, são previstos 122 empreendimentos para coleta e 52 para tratamento, concentrados em áreas de maior densidade e prioridade.

No médio prazo, o atendimento é mais distribuído, como em 2050, quando 46 empreendimentos estão previstos para coleta e 20 para tratamento, indicando um planejamento progressivo e bem distribuído. Ao final do horizonte temporal, até 2080, o total de empreendimentos atendidos alcança 336 tanto para coleta quanto para tratamento, demonstrando o alinhamento das duas etapas.

A previsão populacional da Tabela 20 reflete o impacto direto da expansão da cobertura. Em 2024, estima-se que 26.040 pessoas são beneficiadas pela coleta, enquanto 10.906 pessoas beneficiadas pelo tratamento, concentrando o atendimento inicial em regiões mais populosas. Nos anos seguintes, a expansão abrange populações menores, até atingir um crescimento significativo no longo prazo. Em 2060, por exemplo, 27.404 pessoas serão cobertas pela coleta, enquanto 37.311 serão cobertas pelo tratamento, destacando o foco em empreendimentos de maior porte. O total populacional beneficiado ao longo do período chega a 155.816 pessoas, evidenciando o impacto positivo do planejamento no atendimento às demandas de saneamento básico.

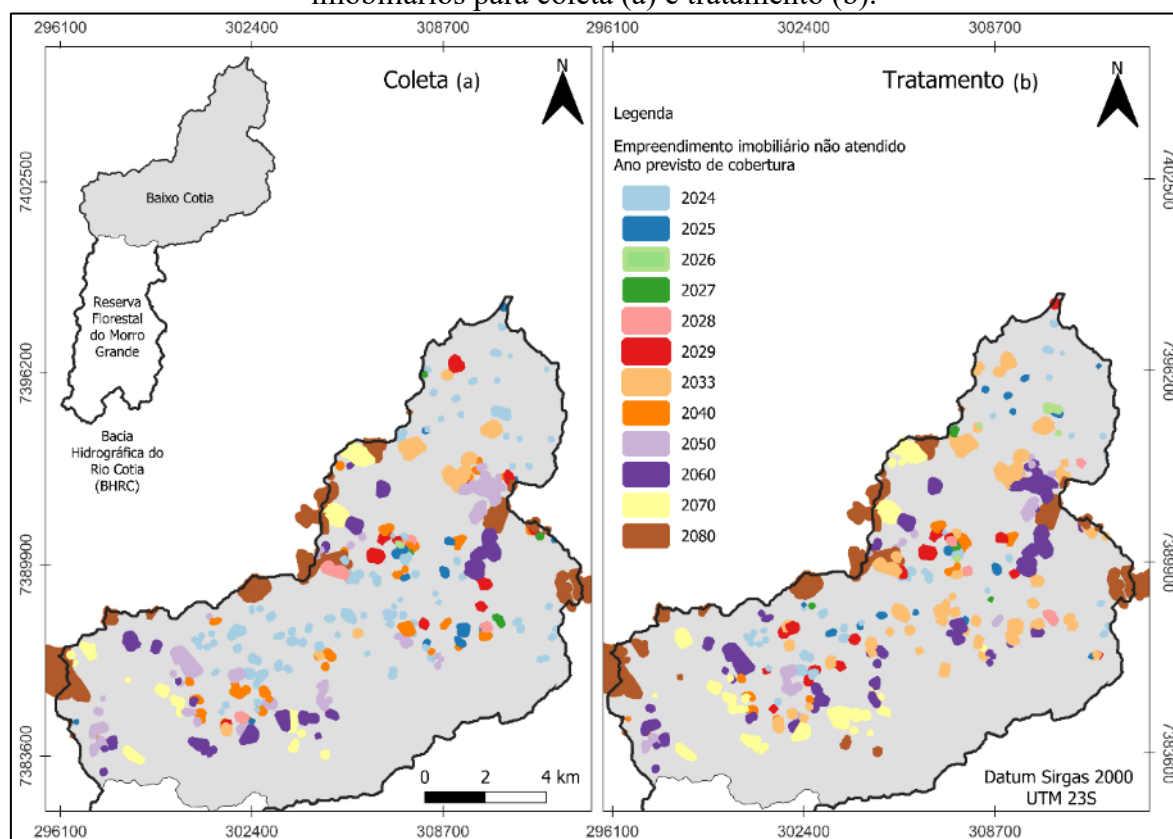
Ainda analisando a Tabela 20, verifica-se que a vazão de esgoto estimada acompanha diretamente o aumento da população atendida. No início do planejamento, em 2024, a coleta apresenta uma vazão de 200,97 L/s, enquanto o tratamento alcança 99,25 L/s, indicando a carga gerada pelos empreendimentos de maior densidade atendidos inicialmente. Em 2060, observa-se um aumento expressivo, com 98,26 L/s para coleta e 158,57 L/s para tratamento, representando o maior volume de esgoto previsto durante o período. Ao final do planejamento, a vazão total de coleta e tratamento atinge 732,60 L/s, reforçando a

necessidade de infraestrutura adequada para suportar o crescimento progressivo da carga de esgoto.

De maneira geral, os dados da Tabela 19 mostram um planejamento estratégico que equilibra a expansão da cobertura, atende populações prioritárias e acompanha o aumento da demanda por tratamento, alinhando-se aos objetivos de universalização do saneamento básico (SALLES, 2009).

A Figura 53 apresenta os empreendimentos imobiliários não atendidos colorizados pelo ano previsto de cobertura, totalizando 336 unidades.

Figura 53. Mapa de previsão de cobertura de esgotamento dos empreendimentos imobiliários para coleta (a) e tratamento (b).



Fonte: Autoria própria.

Analisando a Figura 53, observa-se que a expansão se inicia de forma pontual nas regiões centrais e consolidadas, avançando gradualmente para áreas periféricas e de menor densidade até 2080. No mapa de coleta (Figura 53a), observa-se que os empreendimentos não atendidos se concentram, inicialmente, em áreas mais periféricas e de ocupação recente do Baixio Cotia. As projeções indicam expansão gradativa da rede, com prioridade para zonas urbanas consolidadas e de maior densidade populacional, especialmente próximas às

infraestruturas já existentes. A partir de 2024, a cobertura avança de forma contínua, atingindo os setores intermediários até cerca de 2050 e alcançando as áreas mais afastadas apenas nas etapas finais, próximas a 2080. Esse padrão reflete o comportamento esperado da expansão operacional, que tende a seguir a lógica de viabilidade técnica e econômica da concessionária.

Já no mapa de tratamento (Figura 53b), verifica-se distribuição espacial semelhante, embora com prazos de atendimento ligeiramente mais dilatados em relação à coleta. As coberturas iniciais concentram-se nas proximidades da cobertura de tratamento e dos eixos principais de rede, refletindo a priorização de áreas com maior capacidade de integração ao sistema existente. As projeções indicam avanço progressivo em direção às zonas periféricas e de menor densidade, com universalização prevista até 2080. Essa diferença temporal entre coleta e tratamento evidencia a complexidade adicional envolvida na ampliação da capacidade de tratamento e na interligação dos novos empreendimentos ao sistema principal.

De forma geral, a Figura 53 destaca o equilíbrio entre atender demandas imediatas em áreas urbanas e avançar para regiões periféricas ao longo das décadas. Esse modelo de planejamento demonstra uma progressão estruturada e sustentável, essencial para atender às metas de universalização do saneamento básico. A distribuição espacial reflete um alinhamento entre as necessidades da população e os desafios logísticos de conectar empreendimentos em diferentes contextos ao sistema de coleta e tratamento de esgoto (SILVA et al., 2023c).

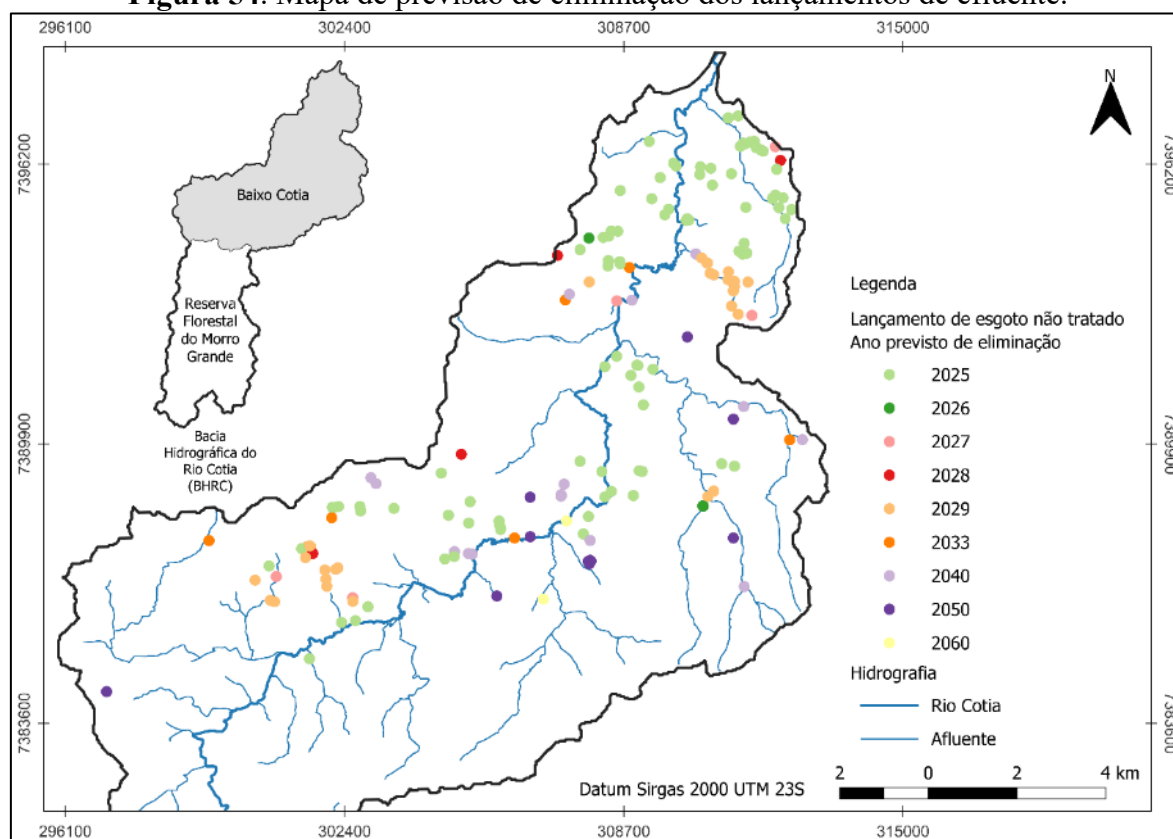
Segundo Kligerman et al. (2023), a tendência de crescimento dos empreendimentos imobiliários está diretamente associada ao aumento da demanda por infraestrutura de esgotamento sanitário, uma vez que a expansão urbana intensifica a necessidade de implantação e ampliação de redes coletoras e de capacidade de tratamento. O desenvolvimento imobiliário ocorre em ritmo mais acelerado que a provisão de infraestrutura pública, gerando defasagens temporárias no atendimento e maior risco de lançamentos irregulares de esgoto (SILVA, 2022a).

Nesse contexto, o saneamento também atua como indutor da valorização imobiliária, reforçando um ciclo de retroalimentação entre infraestrutura e ocupação do solo, o que evidencia a importância do planejamento integrado e do uso de modelos preditivos para

orientar a priorização de investimentos e mitigar impactos ambientais e operacionais decorrentes da expansão urbana recente (ZILIOTTO, 2024).

A Figura 54 apresenta o mapa do ano previsto de eliminação dos 180 lançamentos de esgotos a partir da sobreposição com as coberturas simuladas de tratamento, ou seja, a interligação do ponto de descarte a uma rede coletora que conduz o esgoto para tratamento, sendo a seguinte quantidade eliminada por ano: 97 unidades em 2025, 3 em 2026, 6 em 2027, 4 em 2028, 33 em 2029, 6 em 2033, 17 em 2040, 12 em 2050 e 2 unidades em 2060.

Figura 54. Mapa de previsão de eliminação dos lançamentos de efluente.



Fonte: Autoria própria.

Analisando a Figura 54 observa-se que nos anos iniciais, como 2025 e 2026, a maior concentração de pontos eliminados ocorre ao longo do curso principal do Rio Cotia e em trechos mais próximos de seus afluentes de maior porte. Os pontos representados em verde-claro e verde-escuro estão localizados em áreas de maior densidade populacional, onde o impacto ambiental dos lançamentos é mais significativo. Essa prioridade reflete a estratégia de mitigar rapidamente a poluição em trechos estratégicos da bacia hidrográfica, protegendo o Rio Cotia e suas áreas mais vulneráveis (TONIOLO, 2020b).

A Figura 54 ainda aponta que, entre 2027 e 2029, as ações se expandem para regiões intermediárias, abrangendo afluentes secundários que, embora menores, possuem conexão direta com o curso principal do Rio Cotia. Esses pontos, identificados pelas cores rosa (2027), vermelho (2028) e laranja (2029), estão situados em áreas menos densas, mas ainda próximas da infraestrutura principal. A eliminação desses lançamentos garante que o esforço de despoluição avance de forma integrada entre os diferentes trechos da bacia, reduzindo gradativamente a carga de poluentes (MEDEIROS et al., 2017; TONIOLO et al. 2023b).

A análise da Figura 54 mostra que a partir de 2033, o planejamento foca nos lançamentos localizados em afluentes mais distantes do Rio Cotia, como indicado pelas cores roxa, amarela e lilás, que correspondem aos anos de 2040, 2050 e 2060. Esses pontos estão majoritariamente em áreas periféricas ou de difícil acesso, cujas condições logísticas tornam o atendimento mais desafiador (OLIVEIRA, 2022; ROSSI, 2024).

A universalização do tratamento de esgoto na BHRC somente será viável com a eliminação total dos lançamentos de esgoto não tratado, condição essencial para assegurar a cobertura integral da bacia. Essa eliminação protege não apenas o Rio Cotia, mas também seus afluentes, garantindo a preservação da qualidade da água em toda a rede hidrográfica (TONIOLO et al., 2024a; KUMAR et al., 2025).

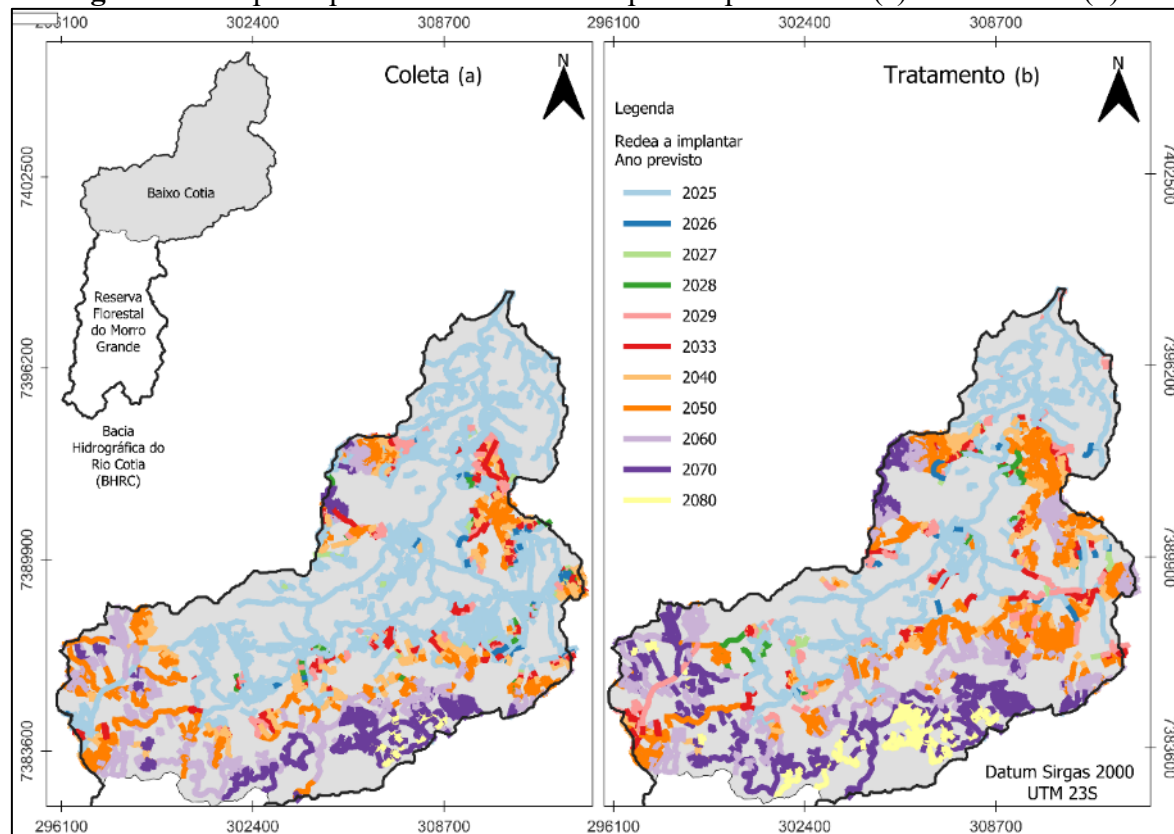
A universalização do tratamento de esgoto está diretamente vinculada aos princípios de ESG (*Environmental, Social and Governance*, ou Ambiental, Social e de Governança), pois a eliminação total dos lançamentos de esgoto não tratado representa não apenas uma melhoria ambiental, mas também avanços sociais e de governança ao reduzir riscos sanitários, proteger recursos hídricos e fortalecer a responsabilidade institucional no setor de saneamento. Estudos recentes indicam que empresas de saneamento no Brasil estão cada vez mais integrando critérios de ESG em suas estratégias de gestão, refletindo a importância dessas práticas para a sustentabilidade e o desempenho de longo prazo do setor (CACIATO et al., 2025).

Assim, a Figura 54 evidencia que o planejamento prioriza a eliminação dos lançamentos com maior impacto ambiental no Rio Cotia e seus afluentes principais nos primeiros anos, garantindo melhorias significativas na qualidade da água desses corpos hídricos. À medida que a infraestrutura de coleta e tratamento avança, o foco se desloca para

áreas mais remotas, assegurando uma despoluição progressiva e completa da BHRC (VON SPERLING, 2016; TONIOLO, 2020b)

A Figura 55 apresenta o mapa das redes coletoras a serem implantadas conforme o ano previsto a partir da sobreposição com as camadas simuladas.

Figura 55. Mapa de previsão das redes a implantar para coleta (a) e tratamento (b).



Fonte: Autoria própria.

Em relação à cobertura, a Figura 55a reflete o planejamento da instalação das redes coletoras de esgoto ao longo do tempo, destacando a priorização de áreas centrais e urbanizadas nos primeiros anos, como 2025 e 2026, indicadas pelas cores azul-claro e azul-escuro. Nessas etapas iniciais, a instalação das redes ocorre principalmente em regiões já parcialmente atendidas ou próximas à infraestrutura existente, como áreas densas do Baixo Cotia. Essa estratégia inicial busca atender rapidamente as regiões com maior demanda populacional e impactos sanitários mais significativos, maximizando a eficiência no curto prazo (TONIOLO, 2020a; ROSSI, 2024).

Conforme o tempo avança, observa-se na Figura 55a uma expansão gradual das redes em direção a áreas periféricas e de menor densidade populacional, especialmente a partir de 2033, quando cores como vermelho e laranja indicam regiões intermediárias da bacia. No

longo prazo, entre 2050 e 2080, a implantação das redes se concentra em áreas mais afastadas e de difícil acesso, representadas pelos tons roxo, lilás e marrom.

Embora o ano de implantação da rede coletora seja definido pela coleta, a cobertura de tratamento pode ser inferida a partir da relação entre a expansão das redes coletoras e as Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs). O mapa de tratamento apresentado na Figura 55b reforça essa relação, indicando que a ampliação da coleta é um fator determinante para o avanço do tratamento, uma vez que o esgoto somente pode ser tratado após ser coletado e conduzido às ETEs (VON SPERLING, 2016).

Analisando a Figura 55b para tratamento, verifica-se que nos primeiros anos, até 2030, a implantação das redes coletoras beneficia áreas mais próximas das ETEs existentes, permitindo uma rápida conexão entre a coleta e o tratamento. Essa proximidade geográfica reflete uma estratégia eficiente de reduzir a necessidade de extensões longas de transporte do esgoto até o tratamento. Entre 2040 e 2080, as redes coletoras começam a se expandir para regiões mais distantes, indicando que a infraestrutura de tratamento precisará ser adaptada para atender essas áreas.

O alinhamento entre a instalação das redes de coleta e a capacidade de tratamento é essencial para garantir que o esgoto coletado seja tratado de maneira adequada. A Figura 55 demonstra indiretamente essa sincronização, já que as coberturas de coleta avançam gradualmente em direção às áreas mais distantes, permitindo que o planejamento de tratamento acompanhe essa expansão ao longo do tempo.

A Tabela 21 apresenta a extensão, em km, das redes a implantar separada por ano.

Tabela 21. Extensão em km das redes a implantar separada por ano.

Ano	Extensão (km)	
	Coleta	Tratamento
2025	312,92	143,15
2026	7,25	5,56
2027	5,68	5,39
2028	7,87	10,94
2029	22,95	36,73
2033	32,45	26,70
2040	56,35	47,71
2050	84,29	146,68
2060	96,06	118,67
2070	76,30	125,28
2080	6,17	41,48

Ano	Extensão (km)	
Coleta	Tratamento	
Total	708,28	708,28

Fonte: Autoria própria.

Em relação à coleta, a Tabela 21 aponta que em 2025, logo no início, observa-se a maior extensão projetada para um único ano, com 312,92 km, o que corresponde a 44,2% do total de 708,28 km. Esse dado reflete a priorização inicial de áreas densamente urbanizadas, onde há maior urgência para a universalização e onde os impactos sanitários e ambientais podem ser mais significativos. Após esse esforço inicial, a extensão anual das redes diminui drasticamente entre 2026 e 2028, com valores variando entre 5,68 km e 7,87 km, indicando um período de consolidação e menor necessidade de expansão imediata.

Verifica-se ainda na Tabela 21 que entre 2029 e 2050, há uma retomada gradual da implantação, com destaque para o ano de 2050, onde a extensão atinge 84,29 km, refletindo a necessidade de atender áreas periféricas ou de maior complexidade técnica. Nos anos finais, como 2060 e 2070, a extensão das redes continua significativa, com 96,06 km e 76,30 km, respectivamente, indicando que a universalização total exige um esforço contínuo em longo prazo. Em 2080, o planejamento se encerra com uma extensão menor, de 6,17 km, representando os últimos ajustes necessários para completar a cobertura.

Em relação ao tratamento, a Tabela 20 exibe que a extensão das redes de transporte associadas ao tratamento também totaliza 708,28 km, refletindo o alinhamento completo com as redes de coleta. Assim como na coleta, 2025 é o ano com maior extensão instalada, com 143,15 km, ou 20,2% do total. Esse dado reforça a lógica de priorizar a capacidade de tratamento em áreas que já serão atendidas pela coleta nos primeiros anos (SABESP, 2024c).

Nos anos seguintes, observa-se ainda na Tabela 20 que a implantação das redes associadas ao tratamento apresenta uma variação mais moderada em comparação com a coleta. Entre 2026 e 2029, as extensões anuais são mais equilibradas, com destaque para 2029, quando se alcançam 36,73 km, refletindo o atendimento de áreas que demandam maior transporte de esgoto até a ETE Barueri.

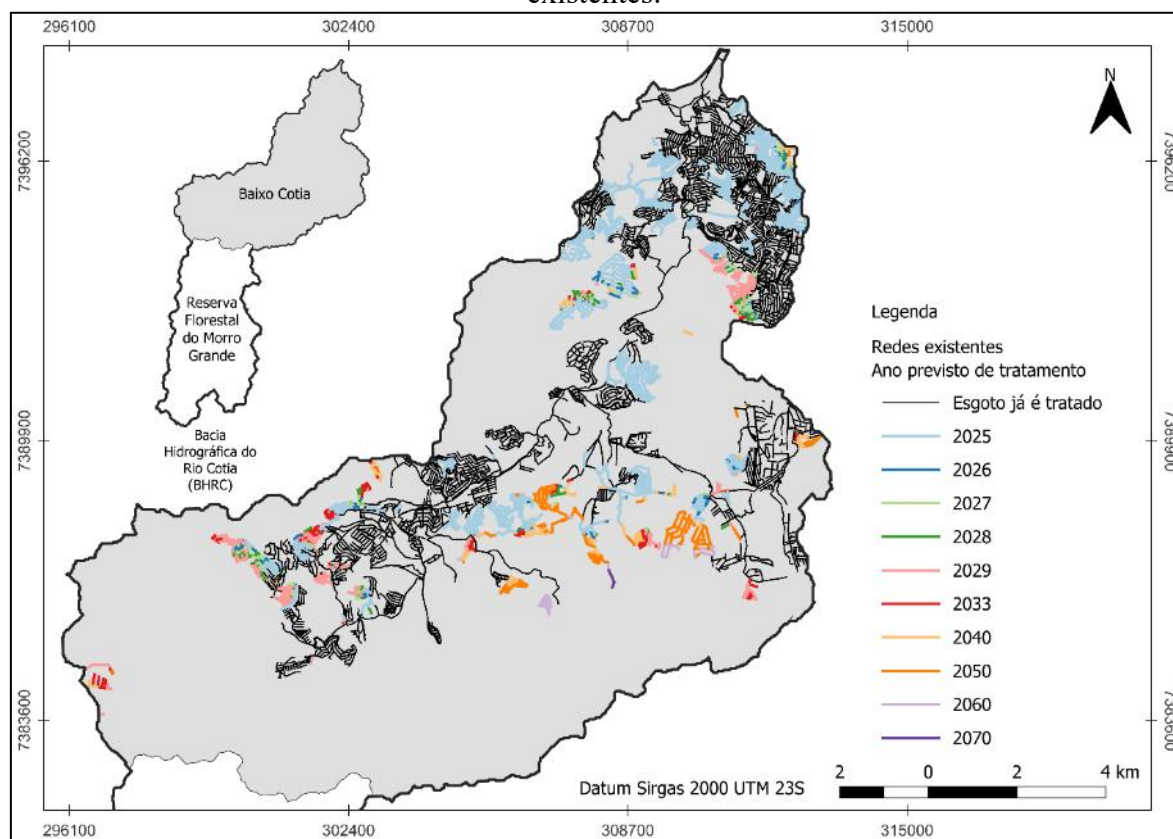
A partir de 2050, observa-se na Tabela 20 uma ampliação significativa, com picos como os de 2050 (146,68 km) e 2070 (125,28 km), indicativos de grandes projetos para atender regiões mais distantes ou de maior complexidade. Nos últimos anos do planejamento, como 2080, a extensão das redes de tratamento atinge 41,48 km, mostrando a

necessidade de ajustes finais para completar a universalização. Assim, a Figura 55 e a Tabela 21 evidenciam que a infraestrutura de tratamento acompanha de forma sincronizada a expansão das redes coletoras.

Destaca-se que a efetiva capacidade de tratamento das redes a implantar depende da eliminação total dos lançamentos de esgoto não tratado, bem como da interligação dessas redes ao sistema de esgotamento existente.

A Figura 56 apresenta as redes existentes, representadas por linhas pretas, responsáveis por conduzir os esgotos coletados às ETEs, e ilustra a progressão temporal a partir da qual essas redes passam a ter seus esgotos tratados.

Figura 56. Mapa de previsão de tratamento do esgoto em função das redes coletoras existentes.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 56 aponta que em 2025, há uma concentração significativa de redes cuja integração ao tratamento está prevista, especialmente nas áreas mais urbanizadas e densamente povoadas do Baixo Cotia e regiões próximas. Essa priorização inicial reflete a necessidade de atender locais onde os impactos ambientais e de saúde pública são mais

críticos, garantindo o máximo benefício sanitário e ambiental nos primeiros anos do planejamento (FRANCO et al., 2024).

Ainda verificando a Figura 56, conforme os anos avançam, nota-se que a integração ao tratamento se expande gradualmente para áreas menos densas e mais periféricas, como indicado pelas cores que representam períodos posteriores, como 2029 e 2033. Essas áreas, geralmente conectadas por redes existentes mais extensas, indicam uma segunda fase do planejamento, na qual as redes principais precisam ser ampliadas ou adaptadas para garantir o transporte adequado dos esgotos a ETE Barueri.

Por fim, a análise da Figura 56 indica que, no período entre 2040 e 2080, o foco da expansão passa a ser a integração de redes localizadas em áreas de menor densidade ou maior complexidade logística, geralmente mais afastadas ou com acesso limitado à infraestrutura existente. Os trechos representados em tons de laranja, roxo e amarelo evidenciam as dificuldades de condução dos esgotos, podendo demandar obras complementares, ajustes na infraestrutura já implantada ou a adoção de soluções alternativas de tratamento (VON SPERLING, 2016).

A Tabela 22 apresenta a extensão em km das redes coletoras existentes em operação classificadas por ano previsto de tratamento.

Tabela 22. Extensão em km das redes existentes em operação separada por ano e tipo.

Ano	Extensão (km)				
	Coletor Tronco	Desconhecido	Linha Recalque	Rede Coletora	Total
Já trata	93,85	43,65	7,95	358,75	504,19
2025	9,45	14,73	0,37	111,17	135,72
2026	0,43	0,83	-	7,66	8,92
2027	0,22	0,95	0,03	7,35	8,55
2028	0,30	0,53	0,24	7,35	8,42
2029	2,23	3,59	0,69	21,98	28,50
2033	0,48	0,50	0,09	7,74	8,81
2040	1,39	0,35	0,32	10,38	12,44
2050	2,79	0,25	-	15,68	18,72
2060	0,25	-	-	3,95	4,20
2070	0,41	-	-	-	0,41
Total	111,80	65,37	9,71	552,02	738,90

Fonte: Autoria própria.

Analisando a Tabela 22, percebe-se que o total de redes existentes consideradas é de 738,90 km, com predominância das redes coletoras, que somam 552,02 km (74,7% do total), evidenciando seu papel essencial na coleta inicial do esgoto e transporte até os coletores tronco ou linhas de recalque.

Em 2024 (Tabela 22), nota-se que 504,19 km de redes já possuíam tratamento, sendo 358,75 km de redes coletoras, 93,85 km de coletores tronco e 7,95 km de linhas de recalque. Além disso, 43,65 km são classificados como "Desconhecido", indicando redes cuja origem ou especificações técnicas (como material ou tipo de instalação) não foram identificadas, mas que já estão em operação.

Ainda analisando a Tabela 22, percebe-se que nos anos seguintes, a inclusão de redes ao sistema de tratamento é gradual e reflete a expansão planejada para integrar as redes existentes ainda não conectadas ao sistema de afastamento. Em 2025, mais 135,72 km de redes passam a conduzir o esgoto ao tratamento, com destaque para as redes coletoras (111,17 km) e os coletores tronco (9,45 km). A partir de 2026, as adições anuais se tornam mais modestas, com valores como 8,92 km em 2026 e 8,55 km em 2027, indicando um ritmo de expansão mais moderado, focado na integração de trechos menores.

No longo prazo, entre 2033 e 2070, as adições de redes são cada vez mais pontuais. Em 2050, por exemplo, são integrados 18,72 km, dos quais 15,68 km são redes coletoras, sugerindo a inclusão de trechos remotos ou de áreas com baixa densidade populacional. Em 2060, a integração é limitada a 4,20 km, enquanto em 2070, apenas 0,41 km é adicionado, refletindo a conclusão do processo de universalização. Esse padrão demonstra que a maior parte das redes existentes será integrada ao tratamento nos primeiros anos do planejamento.

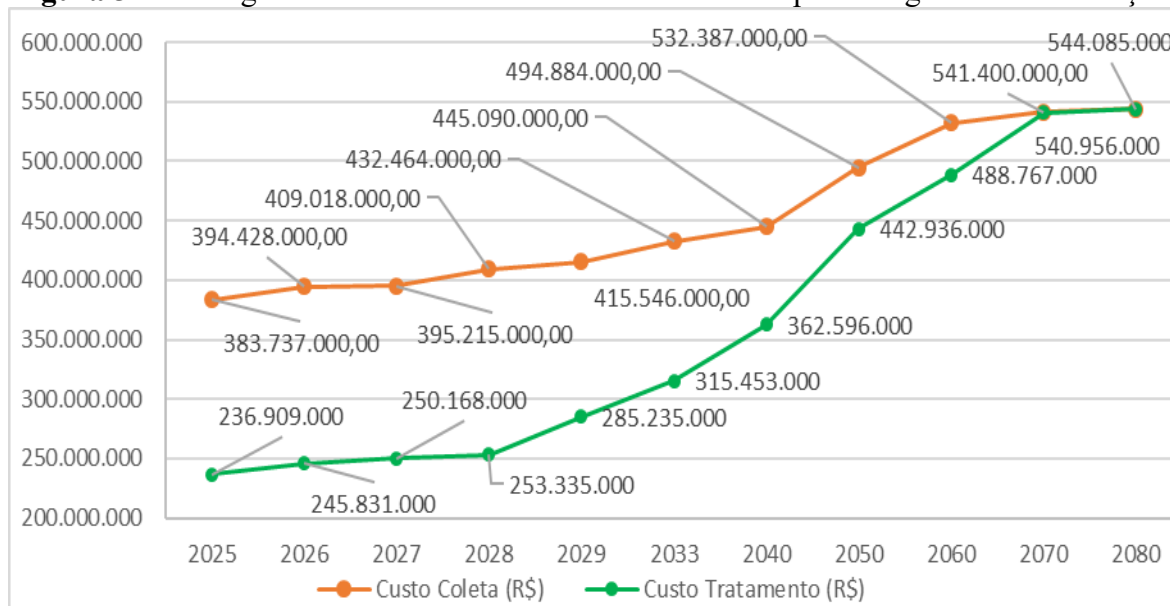
Em relação ao tipo de rede, a Tabela 22 mostra que as redes coletoras predominam na extensão total, com 552,02 km (74,7% do total), refletindo seu papel essencial na captação do esgoto e no transporte inicial até os coletores tronco ou linhas de recalque. Em 2024, 358,75 km dessas redes já estão conectados ao tratamento, com acréscimos graduais nos anos seguintes, especialmente em 2025, quando mais 111,17 km são integrados. Os coletores troncos, com 111,80 km no total, desempenham a função estratégica de transportar grandes volumes de esgoto das redes coletoras até a ETE Barueri, sendo que 93,85 km já estão operacionais e conectados ao tratamento em 2024, com adições pontuais nos anos seguintes. As linhas de recalque, que somam 9,71 km, são usadas para transporte pressurizado do

esgoto em locais onde o relevo não permite o fluxo gravitacional, com 7,95 km já em operação em 2024. Por fim, a categoria Desconhecido, totalizando 65,37 km, inclui redes cuja origem ou especificações técnicas não foram identificadas; dessas, 43,65 km já estão conectadas ao tratamento em 2024, com integração progressiva em menor escala ao longo do tempo.

A Figura 56 e a Tabela 22 demonstram claramente a progressão ordenada do planejamento, com a sincronização entre coleta e tratamento ao longo do tempo. A prioridade inicial em áreas mais densas e o avanço gradual para as regiões mais afastadas refletem um equilíbrio estratégico entre impacto sanitário, viabilidade operacional e universalização do saneamento. Essa abordagem garante que as redes existentes sejam utilizadas de forma eficiente, contribuindo para a ampliação da cobertura de tratamento de esgoto e o cumprimento das metas estabelecidas no Novo Marco Legal do Saneamento (PAULO et al., 2022; SEMIL, 2024).

A Figura 57 ilustra o cronograma de investimentos necessários para viabilizar a universalização do SES na BHRC.

Figura 57. Cronograma de desembolso de obras necessárias para atingir a universalização.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 57 evidencia a evolução dos custos projetados para coleta e tratamento de esgoto na BHRC entre 2025 e 2080. No início do período, os investimentos em coleta são significativamente superiores aos de tratamento, com valores de R\$ 383,7 milhões contra R\$ 236,9 milhões em 2025. Até 2029, a coleta mantém crescimento moderado, atingindo R\$

415,5 milhões, enquanto o tratamento avança de forma mais gradual para R\$ 253,3 milhões. A partir de 2033, observa-se uma aceleração nos custos de tratamento, que passam de R\$ 285,2 milhões para R\$ 315,4 milhões em 2040, enquanto a coleta também cresce, mas em ritmo menos acentuado, chegando a R\$ 432,4 milhões no mesmo ano.

No longo prazo (Figura 57), a tendência é de convergência entre os dois componentes. Em 2060, os custos de coleta alcançam R\$ 532,3 milhões, enquanto o tratamento atinge R\$ 442,9 milhões, reduzindo a diferença histórica. Essa aproximação se intensifica até 2080, quando ambos praticamente se igualam, com R\$ 544,1 milhões para coleta e R\$ 540,9 milhões para tratamento. Segundo Silva (2022a), essa dinâmica indica que, embora a coleta demande maior investimento inicial, o tratamento absorverá parcela crescente dos recursos ao longo do tempo, refletindo a complexidade das obras necessárias para universalização e a priorização de infraestrutura de tratamento nos anos finais do horizonte projetado.

Ressalta-se que os custos apresentados na Figura 57 para coleta e tratamento não são distintos, isto é, não devem somados: tratam-se do mesmo valor, contudo a frequência e o percentual entre a coleta e tratamento não foram abordados nesta pesquisa.

De acordo com estimativas do Instituto Trata Brasil (2025), há uma necessidade aproximada de R\$ 516,4 bilhões para alcançar a universalização do saneamento até 2033, restando cerca de R\$ 454,1 bilhões a serem investidos nesse período (necessário investir em média R\$ 45,1 bilhões por ano entre 2024 e 2033). Esse valor ultrapassa em muito a média anual de investimentos no setor, que gira em torno de R\$ 20 a R\$ 21 bilhões – ou seja, é preciso mais do que dobrar o ritmo atual para atingir as metas do Marco Legal.

Em comparação, a Sabesp planeja investir cerca de R\$ 70 bilhões até 2029 para antecipar quatro anos a universalização dos serviços em sua área de atuação, com um desembolso médio de R\$ 369 por habitante, mais que o triplo da média nacional (R\$ 111/hab.). Esse esforço representa apenas parte do total necessário no cenário nacional, mas ilustra que a empresa está adotando um passo mais acelerado. Em seu plano, há investimentos robustos — mais de R\$ 6,9 bilhões já aplicados em 2024 — visando ampliar a coleta e o tratamento de esgoto a milhões de residências (GLOBO, 2025; SABESP, 2025).

Esses dados confirmam que, embora o esforço da Sabesp seja expressivo, há ainda uma significativa lacuna de financiamento a ser preenchida em âmbito nacional para cumprir as metas do Marco Legal e alcançar a universalização (SALLES, 2009; PAZ et al., 2021).

7.7 ANÁLISE DOS INDICADORES DE ESGOTAMENTO

A Tabela 23 apresenta os indicadores de esgotamento calculados a partir da simulação de cobertura pelo modelo matemático MLP.

Tabela 23. Indicadores de esgotamento sanitário.

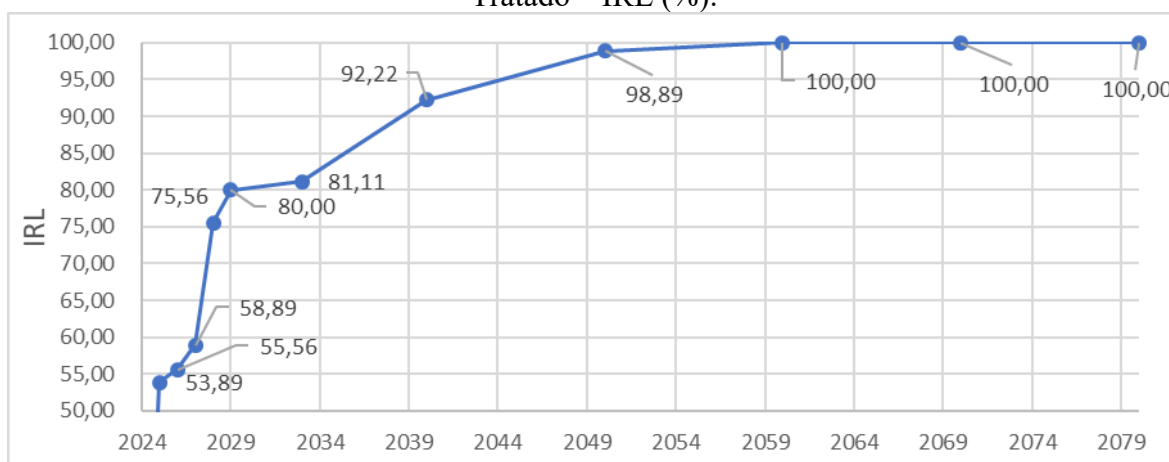
Ano	IRL (%)	ICC (%)	ICT (%)	IPV (%)	IAP (%)	ICH (%)	TECc (%)	TECt (%)	IVNT (%)
2024*	-	88,78	58,05	74,19	89,09	54,15	5,56	14,30	33,70
2025	53,89	90,72	66,67	76,87	89,36	51,88	4,14	16,03	26,35
2026	55,56	90,97	69,27	77,39	89,50	51,94	1,92	5,13	12,66
2027	58,89	91,17	71,64	77,92	89,77	53,49	1,87	4,81	21,36
2028	75,56	91,44	73,68	78,55	90,02	54,56	1,83	4,55	19,08
2029	80,00	91,64	81,33	78,67	90,08	61,02	1,79	4,32	14,14
2033	81,11	92,39	85,50	80,75	90,96	64,69	6,92	16,20	10,08
2040	92,22	93,94	89,54	84,72	92,49	71,29	10,97	23,29	6,71
2050	98,89	96,37	93,60	90,84	94,48	82,62	13,45	25,11	3,78
2060	100,00	98,12	96,51	95,36	95,83	91,50	11,20	18,44	1,55
2070	100,00	99,72	98,94	99,47	97,06	97,36	9,51	14,30	0,67
2080	100,00	100,00	100,00	99,99	97,43	100,00	4,00	8,96	-

Legenda: IRL – Índice de Redução de Lançamento de Esgoto Não Tratado; ICC – Índice de Cobertura de Coleta; ICT – Índice de Cobertura de Tratamento; IPV – Índice de Potencial de Virada; IAP – Índice de Atendimento Populacional; ICH – Índice de Cobertura Hidrográfica; TECc – Taxa de Expansão de Cobertura para Coleta; TECt – Taxa de Expansão de Cobertura para Tratamento; IVNT – Índice de Vazão de Esgoto Não Tratado. * Em 2024 SES é existente, demais anos projetados. Fonte: Autoria própria.

A Tabela 23 aponta que a universalização do SES será alcançada até 2080, com avanços significativos até 2060. O comportamento diferenciado entre coleta e tratamento reflete a complexidade inerente ao sistema, com o tratamento demandando maior esforço técnico e financeiro. A redução do IVNT e a expansão da cobertura hidrográfica demonstram ganhos ambientais, reforçando a importância de políticas sustentáveis e investimentos contínuos na infraestrutura sanitária.

O Índice de Redução de Lançamentos de Esgoto Não Tratado (IRL) (Figura 57) mede a eficiência na eliminação de lançamentos de esgoto não tratado ao longo do tempo. Valores mais altos indicam que um maior número de lançamentos foi incluído na cobertura de tratamento, refletindo avanços na expansão da infraestrutura sanitária. Este indicador é fundamental para avaliar os esforços para mitigar a poluição direta em corpos hídricos, reduzindo os impactos ambientais e melhorando a qualidade da água.

Figura 58. Gráfico da evolução do Índice de Redução de Lançamento de Esgoto Não Tratado – IRL (%).



Fonte: Autoria própria.

Analisando a Figura 58, verifica-se que o IRL começa a ser calculado em 2025 e apresenta uma tendência de crescimento constante, alcançando 100% em 2060. Este aumento demonstra o progresso na inclusão dos lançamentos de esgoto não tratado dentro da cobertura de tratamento, refletindo a eficácia das intervenções ao longo do tempo. No entanto, o crescimento expressivo entre 2025 e 2028 (de 53,89% para 80%) evidencia períodos de forte investimento em infraestrutura de tratamento. Este indicador está diretamente associado à melhoria da qualidade dos corpos hídricos, reduzindo significativamente a carga de poluentes.

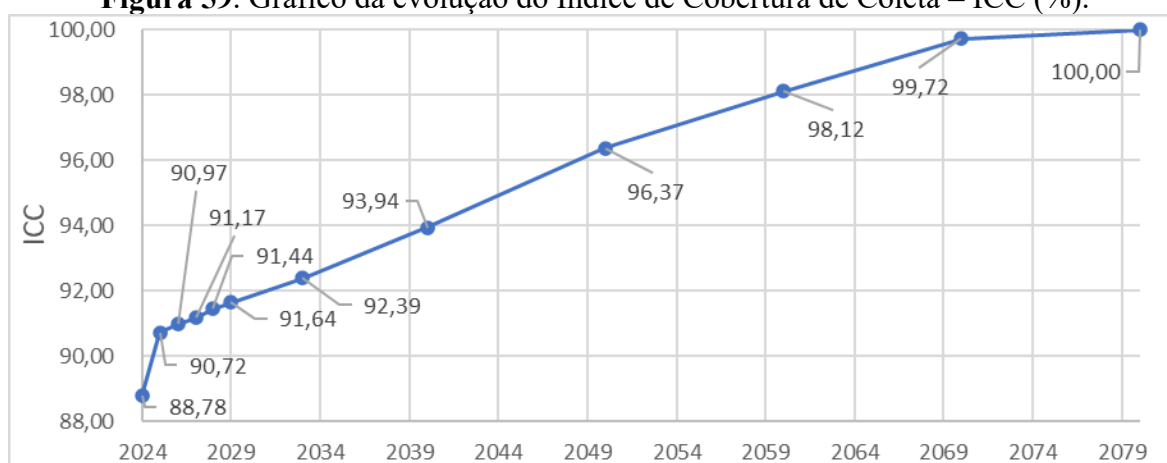
A redução dos lançamentos de esgoto não tratado, medida pelo IRL, é elemento-chave para a concretização do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis), pois a eliminação de despejos melhora a qualidade ambiental urbana e a habitabilidade (VON SPERLING, 2016). Ainda segundo Delanka-Pedige et al. (2021), ações integradas, regulamentação mais rigorosa, direcionamento de recursos para obras de buffer e tratamento além de monitoramento espacial são necessários para reduzir os lançamentos e tornar as cidades mais sustentáveis, especialmente em bacias urbanas densamente ocupadas.

De acordo com De Liz Arcari et al. (2023), índices como o IRL só avançam de forma duradoura quando financiamentos e políticas públicas articulam expansão de redes, estações de tratamento e sistemas de monitoramento – inclusive baseados em geoprocessamento –, reduzindo eventos de descarga pontual e difusa que impactam os rios urbanos; isso reforça a necessidade de priorização técnico-territorial e de instrumentos financeiros que assegurem operação e manutenção contínuas, não apenas implantação pontual de infraestrutura.

Além disso, a análise espacial do IRL permite identificar áreas críticas que continuam fora da cobertura de tratamento, facilitando a priorização de obras. A progressiva redução do LI em relação ao LE também aponta para uma maior eficiência operacional, sendo uma métrica valiosa para acompanhar o progresso da universalização do saneamento.

O Índice de Cobertura de Coleta (ICC) (Figura 59) avalia o percentual de domicílios particulares cobertos pela rede de coleta de esgoto. Este indicador reflete diretamente a capacidade de atendimento das áreas urbanas, onde a densidade populacional é maior. Altos valores indicam avanços significativos na universalização do acesso à coleta.

Figura 59. Gráfico da evolução do Índice de Cobertura de Coleta – ICC (%).



Fonte: Autoria própria.

Observando-se a Figura 59, avalia-se que o ICC começa em 88,78% em 2024 e atinge 100% em 2080. Este crescimento consistente reflete a expansão progressiva da rede coletora de esgoto para alcançar a universalização.

Embora o ICC apresente uma tendência linear de avanço, ele destaca a importância de intervenções planejadas em áreas urbanizadas e periféricas. A cobertura total esperada em 2080 demonstra que a coleta será completamente acessível, eliminando lacunas de serviço.

Por outro lado, regiões com ICC mais baixos demandam atenção, especialmente em áreas periféricas, onde o custo-benefício da implantação de redes de coleta é desafiador. A relação entre ICC e indicadores populacionais é crucial para priorizar investimentos que maximizem a cobertura em áreas densamente povoadas.

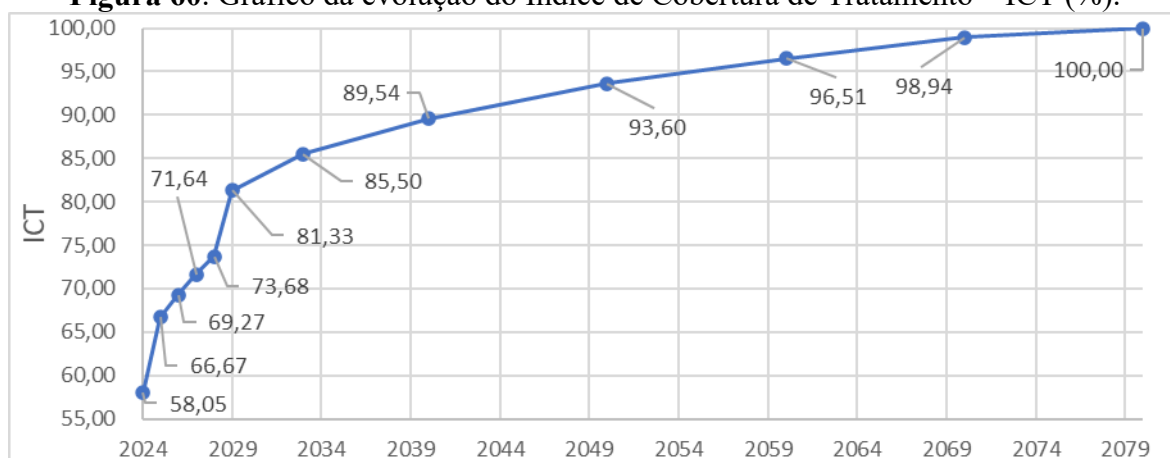
No contexto do ODS 6 – Água Potável e Saneamento –, a ampliação da coleta de esgoto constitui etapa fundamental para garantir o acesso universal ao saneamento, sendo adequadamente representada pelo ICC.

Segundo Van Puijenbroek et al. (2023), políticas públicas e financiamentos direcionados à expansão das redes coletoras são determinantes para o avanço das metas do ODS 6, especialmente em áreas urbanas periféricas e em regiões de crescimento acelerado, onde a ausência de coleta compromete a efetividade do sistema como um todo.

Estudos de Ferreira e Souza (2024) na bacia do Rio Apodi no município de Mossoró (RN) (2021) apontam que déficits persistentes de investimento em coleta resultam em atrasos estruturais que dificultam o cumprimento das metas globais do ODS 6, reforçando a necessidade de planejamento territorial integrado e priorização técnica orientada por indicadores como o ICC.

O Índice de Cobertura de Tratamento (ICT) (Figura 60) mede o percentual de domicílios que têm seus esgotos tratados em relação ao total. Um valor elevado indica que o sistema está avançando na eficiência do tratamento. Comparado ao ICC, o ICT tende a apresentar crescimento mais lento devido à maior complexidade e custo das obras de tratamento.

Figura 60. Gráfico da evolução do Índice de Cobertura de Tratamento – ICT (%).



Fonte: Autoria própria.

A Figura 60 exibe que o ICT, que inicia em 58,05% em 2024, cresce mais lentamente que o ICC, alcançando 100% somente em 2080. Isso reflete a maior complexidade e o custo associado à expansão da infraestrutura de tratamento. A discrepância inicial entre ICC e ICT ressalta a necessidade de atenção especial às áreas onde o esgoto coletado não é tratado, apontando para investimentos críticos em Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs).

Adicionalmente, o ICT reflete também de forma direta os impactos ambientais. Uma baixa cobertura de tratamento implica maior emissão de esgotos não tratados em corpos

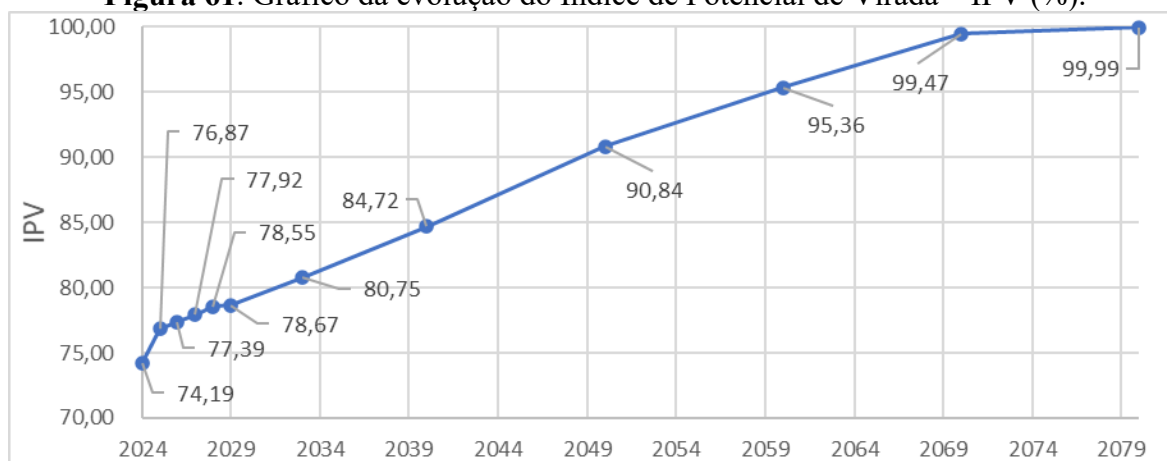
hídricos, elevando os riscos de degradação ambiental. Assim, ele é um termômetro para políticas públicas voltadas à preservação de recursos hídricos.

O Índice de Potencial de Virada (IPV) (Figura 61) avalia a transição de ligações TL0 (somente água) para TL1 (água e esgoto), destacando áreas com maior potencial de conexão. Altos valores de IPV refletem a eficácia de iniciativas voltadas à expansão da coleta em áreas anteriormente não atendidas.

O avanço do ODS 6 está igualmente condicionado à ampliação do tratamento adequado dos esgotos coletados, dimensão que pode ser analisada por meio do ICT. Segundo Silva (2022b), mesmo em contextos onde a coleta apresenta expansão significativa, a limitação de investimentos em estações de tratamento e sistemas complementares compromete o alcance das metas do ODS 6, em especial aquelas relacionadas à redução da poluição hídrica e à melhoria da qualidade ambiental.

Nesse sentido, políticas públicas e instrumentos de financiamento voltados especificamente ao tratamento são essenciais para elevar o ICT de forma sustentável, evitando a perpetuação de lançamentos de esgoto não tratado e assegurando a efetividade ambiental da universalização do saneamento.

Figura 61. Gráfico da evolução do Índice de Potencial de Virada – IPV (%).



Fonte: Autoria própria.

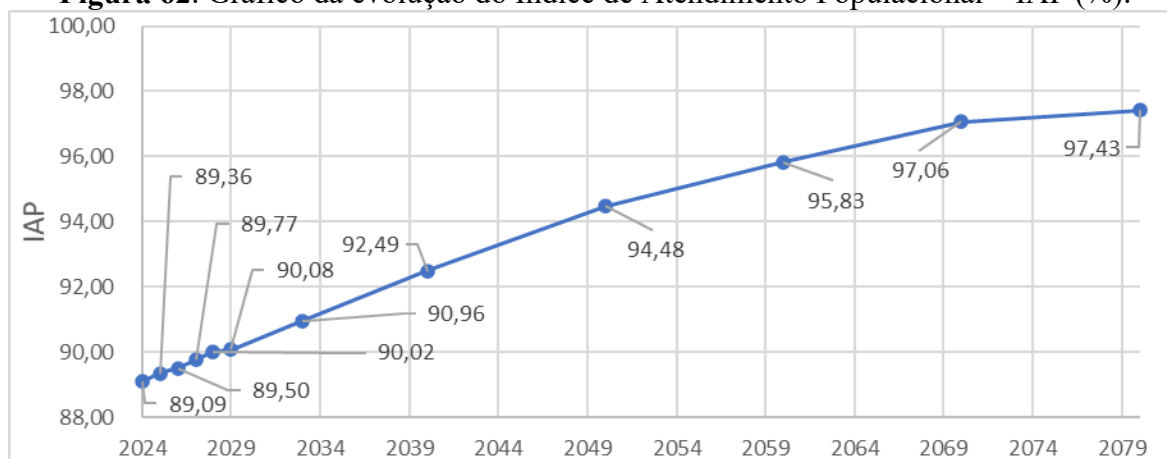
A Figura 61 mostra que o IPV inicia em 74,19% em 2024, crescendo rapidamente até alcançar 99,99% em 2080. Este indicador reflete o avanço na conversão de ligações TL0 (somente água) para TL1 (água e esgoto), indicando a progressiva universalização das conexões. O aumento acelerado do IPV até 2060 evidencia esforços direcionados para incluir

setores ainda desconectados, especialmente em áreas urbanas com maior densidade populacional.

Este indicador também expõe lacunas na universalização do esgoto, identificando setores que ainda dependem de infraestrutura adicional. O IPV é particularmente útil para otimizar estratégias de expansão da rede, priorizando localidades onde o impacto será mais significativo.

O Índice de Atendimento Populacional (IAP) (Figura 62) mede a porcentagem da população atendida em função da sobreposição de coberturas de coleta com setores censitários. Esse indicador é crucial para avaliar a eficiência do sistema em termos de abrangência populacional.

Figura 62. Gráfico da evolução do Índice de Atendimento Populacional – IAP (%).



Fonte: Autoria própria.

Observando a Figura 62, nota-se que o IAP apresenta uma trajetória estável e progressiva, iniciando em 89,09% em 2024 e chegando a 97,43% em 2080. Este indicador demonstra que a expansão das coberturas de coleta cobre um percentual significativo da população ao longo do tempo. A alta cobertura populacional reforça a eficiência das políticas de expansão do sistema, beneficiando tanto áreas densamente habitadas quanto regiões periféricas.

A análise do IAP permite identificar disparidades regionais no atendimento, possibilitando ações específicas para áreas densamente povoadas e com infraestrutura deficiente. Ele é particularmente relevante para medir o impacto social do sistema de esgotamento sanitário.

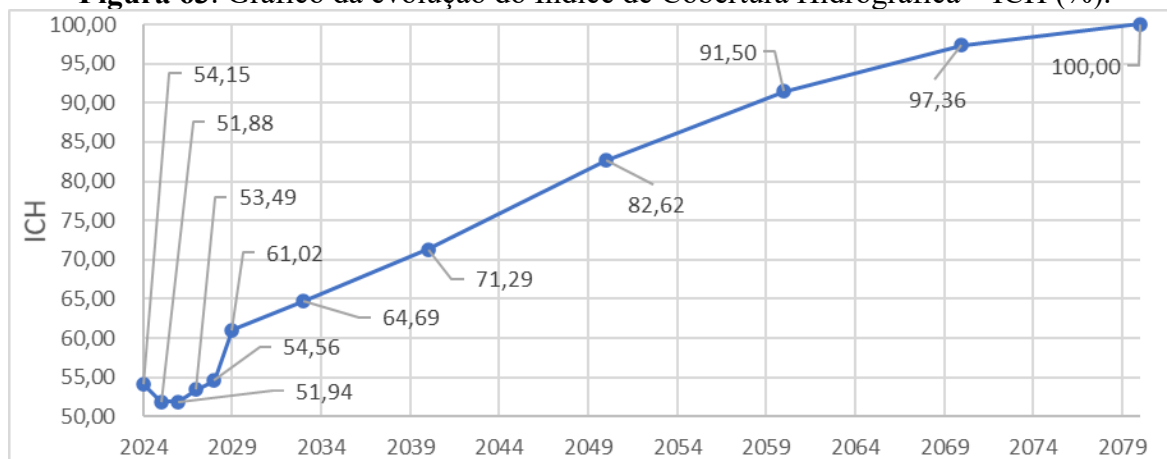
A efetividade das políticas públicas e dos mecanismos de financiamento no saneamento básico influencia diretamente a redução das desigualdades socioespaciais, em consonância com o ODS 10 – Redução das Desigualdades –, o que pode ser avaliado por meio do IAP.

Segundo Gosh et al. (2023), embora haja avanço na expansão da infraestrutura de esgotamento sanitário, o atendimento permanece desigual entre áreas centrais e periféricas, refletindo a priorização histórica de investimentos em territórios mais consolidados e economicamente atrativos.

Nesse contexto, políticas públicas orientadas por critérios redistributivos e modelos de financiamento que incorporem subsídios e planejamento territorial mostram-se essenciais para ampliar o IAP em áreas socialmente vulneráveis, contribuindo para a mitigação das desigualdades no acesso aos serviços de esgotamento sanitário (HOFMANN et al., 2025).

O Índice de Cobertura Hidrográfica (ICH) (Figura 63) mede a extensão de rios perenes protegidos pela cobertura de tratamento em relação àqueles dentro da cobertura de coleta. Valores elevados indicam maior proteção ambiental, reduzindo riscos de contaminação hídrica.

Figura 63. Gráfico da evolução do Índice de Cobertura Hidrográfica – ICH (%).



Fonte: Autoria própria.

A análise da Figura 63 evidencia que O ICH inicia em 54,15% em 2024 e atinge 100% em 2080. Este crescimento reflete a inclusão progressiva de corpos hídricos na cobertura de tratamento, garantindo maior proteção ambiental. A expansão da cobertura hidrográfica reduz a poluição direta nos rios, contribuindo para a preservação ambiental e a melhoria da qualidade da água.

Este indicador destaca a interseção entre saneamento e preservação ambiental, apontando áreas prioritárias para expansão da cobertura de tratamento, especialmente em regiões com corpos hídricos vulneráveis.

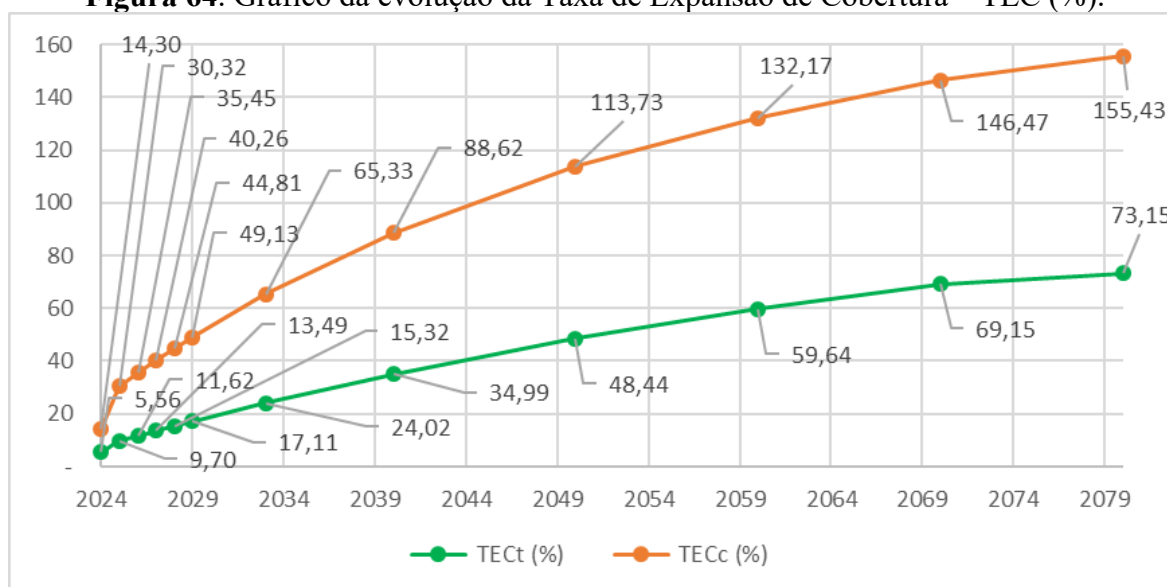
A incorporação do ODS 18 (Igualdade Étnico-Racial) ao planejamento do saneamento evidencia a necessidade de políticas públicas e financiamentos que considerem desigualdades territoriais historicamente associadas a grupos socialmente vulnerabilizados, o que pode ser analisado por meio do ICH.

Segundo Dickin e Gabrielsson (2023), a distribuição espacial desigual da infraestrutura de esgotamento ao longo das bacias hidrográficas reflete padrões estruturais de exclusão, resultando em menor proteção ambiental e sanitária em territórios periféricos e socialmente marginalizados, em desacordo com os princípios de equidade presentes nos ODS's.

Nesse contexto, o avanço do ICH depende da adoção de critérios de justiça territorial e equidade social na alocação de recursos e na priorização de investimentos, alinhando a expansão do saneamento às diretrizes do ODS 18.

A Taxa de Expansão de Cobertura (TEC) (Figura 64) mede o crescimento percentual da cobertura de coleta e tratamento em relação ao período anterior. Ele reflete diretamente os avanços na infraestrutura física do SES.

Figura 64. Gráfico da evolução da Taxa de Expansão de Cobertura – TEC (%).



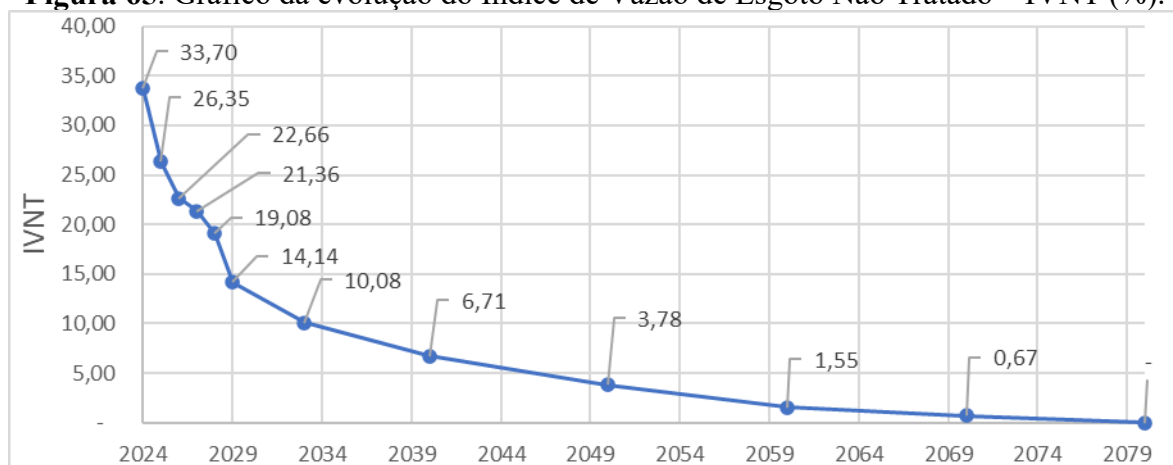
Fonte: Autoria própria.

Conferindo a Figura 64, percebe-se que os indicadores TEC_c (coleta) e TEC_t (tratamento) mostram taxas de expansão variáveis ao longo do tempo. A TEC_c tem picos em 2033 e 2040, enquanto a TEC_t apresenta crescimento mais lento e constante, refletindo os desafios técnicos e econômicos da expansão do tratamento. Essas taxas destacam períodos estratégicos de investimentos e obras, permitindo monitorar o ritmo do progresso em diferentes fases do projeto.

Análises temporais da TEC identificam padrões de crescimento e revelam a eficiência de investimentos. Taxas mais altas indicam períodos de maior avanço na universalização, enquanto taxas baixas podem sinalizar necessidade de ajustes no planejamento estratégico.

O Índice de Vazão de Esgoto Não Tratado (IVNT) (Figura 65) avalia o volume de esgoto coletado, mas não tratado, dentro da cobertura de coleta. Valores mais baixos são desejáveis, indicando que mais esgoto está sendo tratado antes de seu descarte.

Figura 65. Gráfico da evolução do Índice de Vazão de Esgoto Não Tratado – IVNT (%).



Fonte: Autoria própria.

A Figura 65 sinaliza que o IVNT, que inicia em 33,70% em 2024, apresenta uma redução constante, atingindo 1,55% em 2060 e desaparecendo completamente em 2080. Este declínio reflete o sucesso na ampliação das coberturas de tratamento, eliminando volumes de esgoto não tratados. Este indicador é fundamental para apontar a eficiência geral do sistema. Em áreas com IVNT elevado, há maior risco de impactos ambientais negativos, como contaminação de solo e água. Ele também sinaliza a necessidade de expansão das ETEs em áreas críticas.

Segundo Albach e Moura (2025), a insuficiência de investimentos em sistemas de tratamento de esgoto constitui um dos principais entraves ao cumprimento das metas do

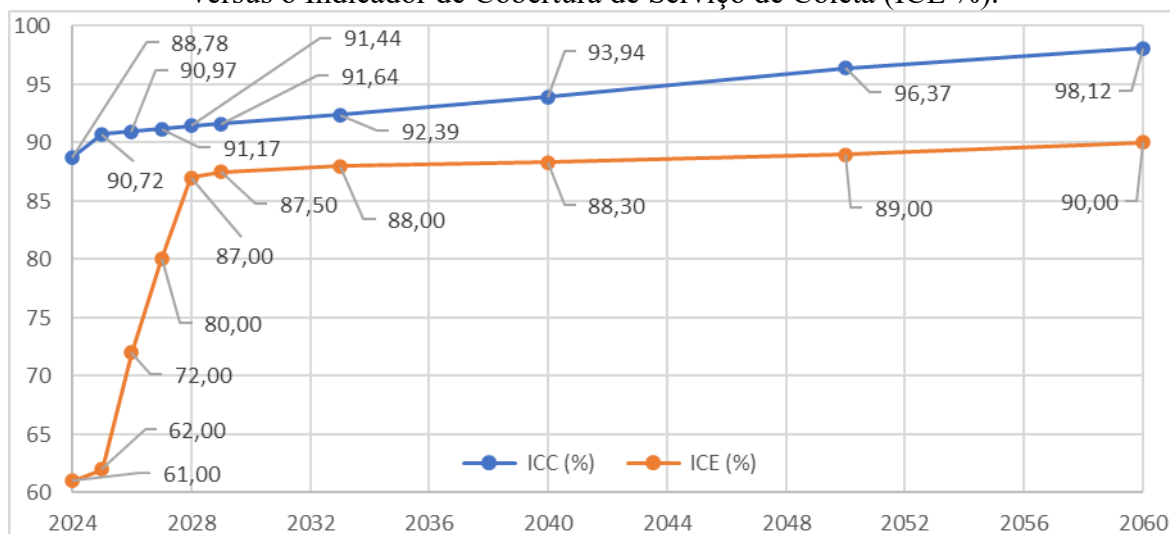
ODS 6, uma vez que a permanência de lançamentos de efluentes sem tratamento degrada os corpos hídricos, eleva a carga poluidora e aprofunda desigualdades regionais, evidenciando a necessidade de ampliar o aporte de recursos e os instrumentos de financiamento para reduzir de forma sustentada o IVNT e viabilizar a universalização do saneamento de maneira ambientalmente segura até 2030.

Os indicadores de esgotamento corroboram que a modelagem apresenta restrições relacionadas aos fatores não capturados pelas variáveis utilizadas, como dinâmicas populacionais, vetores de crescimento urbano, políticas habitacionais e processos de ocupação do solo. Esses elementos, assim como decisões administrativas, econômicas e regulatórias, situam-se fora do controle direto da concessionária e podem influenciar o ritmo e a abrangência da universalização. Dessa forma, os resultados devem ser compreendidos como projeções operacionais baseadas nas condições sob responsabilidade da concessionária, e não como previsões determinísticas do processo de expansão.

7.8 ANÁLISE COMPARATIVA DE DADO SIMULADO COM DADO PRÉ EXISTENTE

A Figura 66 apresenta a comparação entre o Índice de Cobertura de Coleta de Esgoto (ICC), desenvolvido nesta pesquisa, e o Indicador de Cobertura do Serviço de Coleta (ICE), definido como indicador de meta no novo Contrato de Concessão da Sabesp (SEMIL, 2024). Observa-se que ambos são conceitualmente equivalentes, pois avaliam a cobertura da coleta.

Figura 66. Gráfico da comparação do Índice de Cobertura de Coleta de Esgoto (ICC %) versus o Indicador de Cobertura de Serviço de Coleta (ICE %).



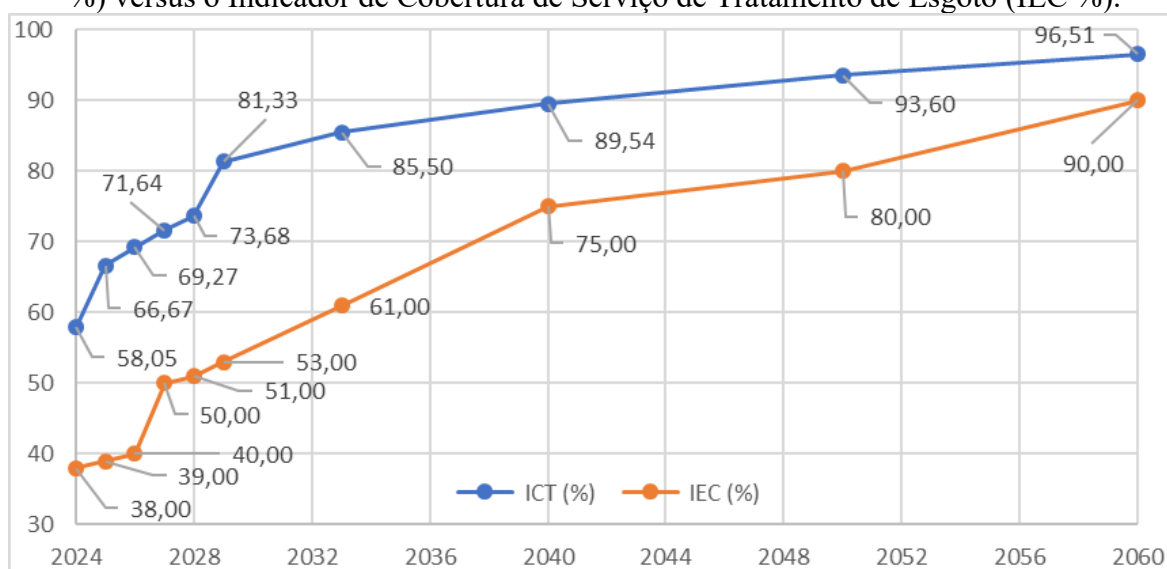
Fonte: Autoria própria.

Analisando a Figura 66, observa-se que desde 2024 o ICC permanece consistentemente acima do ICE, indicando que as metas contratuais de universalização da coleta serão atingidas sem dificuldades. Em 2024, enquanto o ICE registra um valor inicial de 61%, o ICC já apresenta 88,72%, apontando uma diferença significativa em favor do dado existente. Nos anos seguintes, o ICE cresce rapidamente, alcançando 87% em 2028, embora ainda inferior ao ICC, que registra 91,44% no mesmo período.

Ao longo do tempo, a diferença entre os indicadores reduz-se gradualmente, mas o ICC continua superior ao ICE em todos os anos analisados. Em 2040, o ICE chega a 88,30%, enquanto o ICC avança para 93,94%. Finalmente, em 2060, o ICE atinge a meta contratual de universalização de 90%, enquanto o ICC projeta um índice de 98,12%, superando amplamente o objetivo estabelecido. Essa comparação demonstra que a universalização da coleta de esgoto, conforme as metas contratuais, é alcançada considerando a bacia como um todo, com o dado simulado indicando um desempenho superior ao exigido em todo o horizonte temporal.

De forma análoga, a Figura 67 apresenta a comparação entre o Índice de Cobertura de Tratamento de Esgoto (ICT), desenvolvido nesta pesquisa, e o Indicador de Cobertura do Serviço de Tratamento (IEC), estabelecido como indicador de meta no novo Contrato de Concessão da Sabesp (SEMIL, 2024). Observa-se que ambos são conceitualmente equivalentes, pois avaliam a cobertura do tratamento de esgoto.

Figura 67. Gráfico da comparação do Índice de Cobertura de Tratamento de Esgoto (ICT %) versus o Indicador de Cobertura de Serviço de Tratamento de Esgoto (IEC %).



Fonte: Autoria própria.

A Figura 67 aponta que em 2024 o ICT já atinge 58,05%, enquanto o IEC registra apenas 38%. Essa diferença inicial reflete um avanço significativo do dado simulado em relação às metas estabelecidas. O IEC apresenta um crescimento expressivo até 2028, quando alcança 51%, mas ainda inferior ao ICT, que registra 73,68% no mesmo ano. No médio prazo, ambos os indicadores continuam a crescer, mas o ICT mantém uma vantagem consistente.

Ainda analisando a Figura 67, nota-se que em 2040, o IEC chega a 75%, enquanto o ICT alcança 89,54%, evidenciando uma diferença ainda favorável ao dado simulado. No final do horizonte, em 2060, o IEC atinge a meta contratual de 90%, enquanto o ICT projeta 96,51%, superando amplamente as exigências. Esse padrão reforça que, com base nos dados simulados, o tratamento de esgoto na BHRC não apenas atingirá a universalização prescrita no contrato da Sabesp, mas também excederá as metas em todos os anos projetados.

Observa-se na Figura 67 que, assim como ocorre na coleta, o ICT permanece sistematicamente superior ao IEC ao longo de todo o horizonte analisado, indicando que as metas contratuais de universalização do tratamento tendem a ser atingidas, quando considerados os valores globais, sem detalhamento por recortes territoriais.

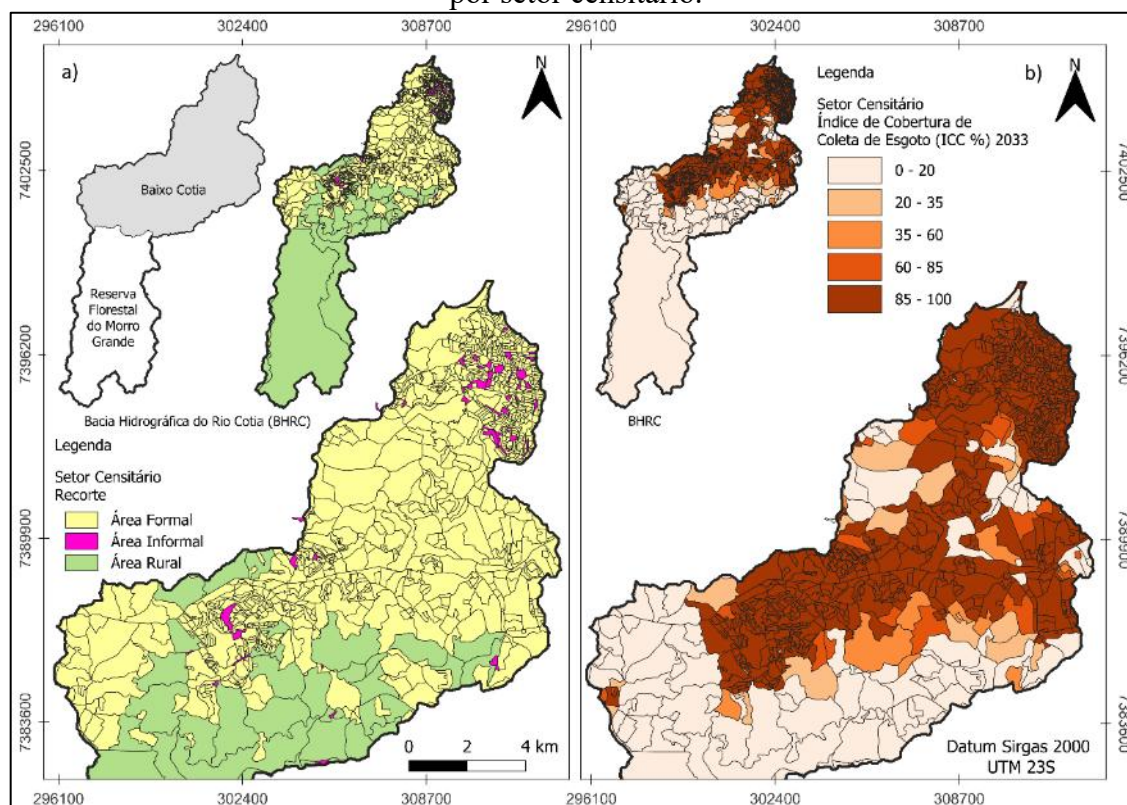
Os índices ICC e ICT corroboram que a pesquisa apresenta caráter inédito ao aplicar técnicas de modelagem espacial e preditiva para representar o processo de universalização do esgotamento sanitário sob a ótica operacional da concessionária.

Diferentemente das abordagens tradicionais, que tratam a universalização de forma normativa ou exclusivamente socioeconômica, o estudo integra variáveis físicas, técnicas e operacionais em um ambiente geoespacial, possibilitando a simulação territorial da expansão dos sistemas de coleta e tratamento.

Essa abordagem inédita permite visualizar o alcance potencial da universalização com base em critérios objetivos de infraestrutura e operação, oferecendo uma perspectiva inovadora e replicável para o planejamento estratégico do saneamento (SABESP, 2025).

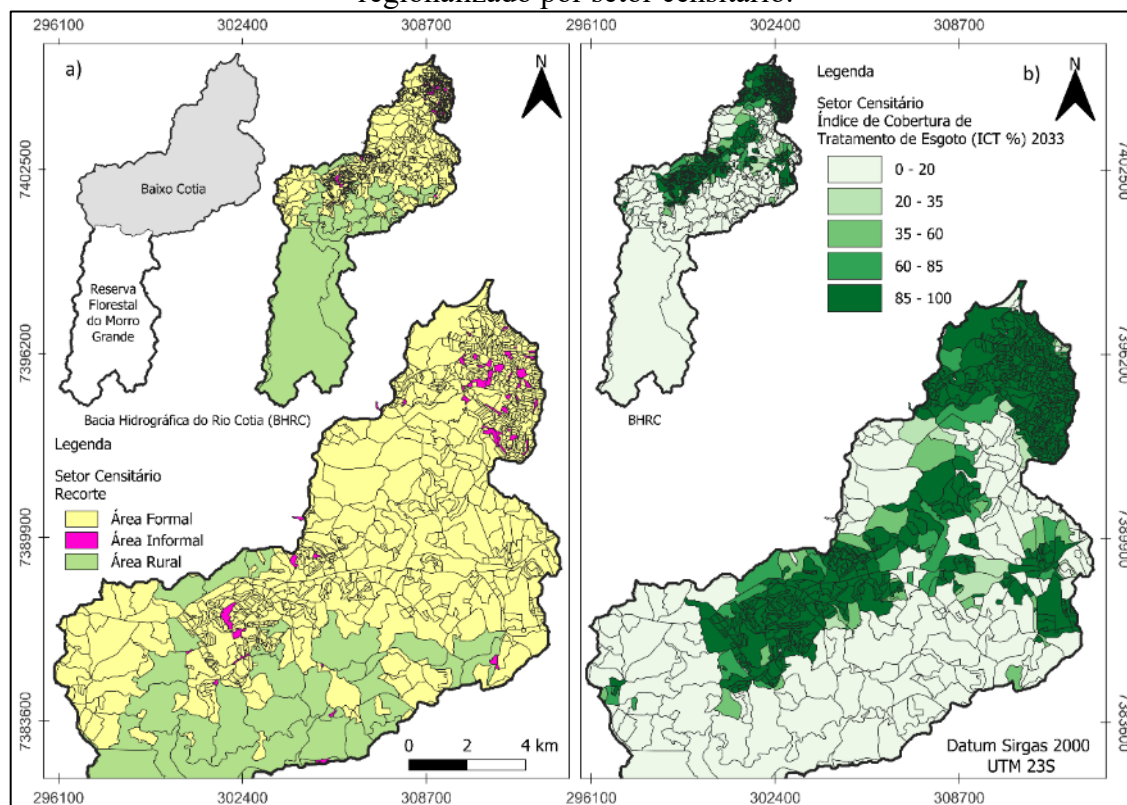
As Figuras 68 e 69 exibem os mapas por recorte territorial, do ICC (%) e do ICT (%) de 2033, isto é, divididos por setor censitário.

Figura 68. Mapa do Índice de Cobertura de Coleta de Esgoto (ICC %) 2033 regionalizado por setor censitário.



Fonte: Autoria própria.

Figura 69. Mapa do Índice de Cobertura de Tratamento de Esgoto (ICT %) 2033 regionalizado por setor censitário.



Fonte: Autoria própria.

As Figuras 68a e 69a mostram que a regionalização por setores censitários na BHRC abrange um total de 1.097 unidades, dos quais a maioria, 995 setores, é composta por áreas formais (urbanas), representando 90,7% do total. As áreas informais, que correspondem a 50 setores (4,6%), estão localizadas em pontos específicos, especialmente em regiões urbanas densas, refletindo a presença de favelas e ocupações irregulares. Já as áreas rurais, com 52 setores (4,7%), estão distribuídas nas extremidades da bacia, principalmente nas regiões sul e sudeste, caracterizadas por baixa densidade populacional e maior dispersão das habitações.

Essa configuração apresentada nas Figuras 68a e 69a evidencia a predominância de áreas formais no território da BHRC, mas ressalta também a importância de atender as áreas informais e rurais, que, apesar de representarem uma fração menor, apresentam desafios significativos para a universalização da coleta e do tratamento de esgoto (TONIOLO, 2024a).

Analisando o mapa do ICC de 2033 regionalizado por setor censitário da Figura 68a, observa-se que as áreas urbanas formais, especialmente no centro e no norte da Baixo Cotia, concentram os setores com maior cobertura, predominando valores entre 85% e 100%, representados pelas tonalidades mais escuras de laranja.

Em contrapartida, setores com índices mais baixos, entre 0% e 60%, estão majoritariamente localizados nas áreas rurais e em algumas áreas informais, refletindo as dificuldades logísticas e estruturais para instalação de redes em regiões de menor densidade populacional ou urbanização irregular. Destaca-se a zona oeste da BHRC que é área urbana, porém com valores de até 20% do ICC. Setores com cobertura intermediária, entre 60% e 85%, aparecem como transição entre áreas urbanas e rurais, indicando progresso parcial.

Em relação à distribuição para o cenário de coleta de 2033 (Figura 68b), prevê-se que para a área formal, mais de 80% dos setores em área urbana possuirão valor de ICC superior ou igual a 90%; para área informal, das 50 favelas, 44 (88%) terão ICC igual 100% e somente seis ficarão sem cobertura no ano analisado – favelas da Rua Furquim, Sítio Rima, Colinas de Cotia, Tomé, Parque Miguel Mirizola e Fazenda Atalaia –; por fim para as áreas rurais, somente quatro setores possuirão valor de coleta superior a 80% e 48 setores ficarão predominantemente sem cobertura de coleta, corroborando a necessidade de simulação para anos posteriores.

Analisando o mapa do ICT de 2033 regionalizado por setor censitário da Figura 69a, verifica-se que as áreas formais possuem as faixas mais altas de ICT, com cobertura superior a 85%, evidenciando o foco do planejamento no atendimento dessas regiões densamente povoadas. Da mesma forma, a maioria das áreas informais possuem alto valor de ICT, porém algumas ainda carecem de atendimento, refletindo os desafios técnicos de tratamento de esgoto. Nas áreas rurais, verifica-se que o ICT é majoritariamente inferior a 20%, reforçando a dificuldade de infraestrutura em regiões dispersas e de baixa densidade demográfica.

Em relação à distribuição para o cenário de tratamento de 2033 (Figura 69b), prevê-se que para a área formal, mais de 70% dos setores urbanos possuirão valor de ICT superior ou igual a 70%; para área informal, das 50 favelas, 44 (88%) terão ICT superior a 90% e somente seis, as mesmas supracitadas, por fim para as áreas rurais, somente quatro setores possuirão valor de coleta superior a 50% e 48 setores ficarão predominantemente com os valores zerados de ICT.

É importante destacar que os resultados da regionalização do ICC e ICT – Figuras 68 e 69 respectivamente – representam a universalização sob a ótica operacional da concessionária, considerando a expansão dos sistemas sob sua gestão. A modelagem não incorpora variáveis populacionais, vetores de crescimento urbano ou outros fatores externos, como dinâmicas de ocupação e políticas públicas, que podem influenciar a efetiva ampliação do atendimento. Ademais, sistemas isolados de esgotamento, como os operados por condomínios fechados, não são contabilizados nas projeções, por estarem fora do controle da concessionária e do conceito de cobertura formal.

A Tabela 24 apresenta os valores médios do ICC e ICT para os recortes formais, informais e rurais.

Tabela 24. Valores médios dos índices de coleta e tratamento de esgoto por recorte territorial.

Ano	ICE (%)	ICC BHRC (%)	ICC Formal (%)	ICC Informal (%)	ICC Rural (%)	IEC (%)	ICT BHRC (%)	ICT Formal (%)	ICT Informal (%)	ICT Rural (%)
2024	61,00	88,78	79,36	87,15	8,98	38,00	58,05	53,27	53,22	1,85
2025	62,00	90,72	82,02	88,00	8,88	39,00	66,67	59,33	64,90	0,56
2026	72,00	90,97	82,55	88,05	9,26	40,00	69,27	61,67	67,82	0,80
2027	80,00	91,17	82,86	88,08	9,33	50,00	71,64	64,12	69,39	1,86
2028	87,00	91,44	83,30	88,12	9,65	51,00	73,68	66,23	71,42	2,29
2029	87,50	91,64	83,44	88,56	10,07	53,00	81,33	71,95	86,11	3,60

Ano	ICE (%)	ICC BHRC (%)	ICC Formal (%)	ICC Informal (%)	ICC Rural (%)	IEC (%)	ICT BHRC (%)	ICT Formal (%)	ICT Informal (%)	ICT Rural (%)
2033	88,00	92,39	84,77	89,22	10,98	61,00	85,50	76,28	88,65	6,10
2040	88,30	93,94	87,16	90,10	16,38	75,00	89,54	81,28	90,01	9,46
2050	89,00	96,37	90,44	92,92	23,98	80,00	93,60	86,59	90,92	13,78
2060	90,00	98,12	92,40	94,02	37,08	90,00	96,51	90,50	93,71	28,31

Legenda: BHRC – Bacia Hidrográfica do Rio Cotia; ICC – Índice de Cobertura de Coleta de Esgoto; ICE – Indicador de Cobertura do Serviço de Coleta; ICT – Índice de Cobertura de Tratamento de Esgoto e IEC – Indicador de Cobertura do Serviço de Tratamento de Esgoto. Fonte: Autoria própria.

Os resultados apresentados na Tabela 24 indicam que, de forma geral, os índices de cobertura de coleta (ICC) e de tratamento (ICT) na BHRC atendem às metas de universalização estabelecidas no novo Contrato de Concessão da Sabesp, isto é, sua desestatização, com exceção das áreas rurais.

Em 2024, o ICC médio da BHRC já atinge 88,78%, superando a meta de ICE para esse ano, que é de 61%. Esse padrão de atendimento às metas se mantém em todos os anos subsequentes, com o ICC da BHRC alcançando 98,12% em 2060, enquanto o ICE estipulado é de 90%. Nas áreas formais, o ICC também atende às metas em todos os anos, com valores iniciais de 79,36% em 2024 e chegando a 92,40% em 2060. As áreas informais apresentam desempenho semelhante, com ICC de 87,15% em 2024, crescendo de forma consistente até atingir 94,02% em 2060. Por outro lado, nas áreas rurais, o ICC é significativamente inferior, começando com apenas 8,98% em 2024 e atingindo 37,08% em 2060, ficando muito aquém das metas previstas para universalização.

Ainda analisando a Tabela 24, no que se refere ao ICT, verifica-se que a situação segue o mesmo padrão observado no ICC. O ICT da BHRC em 2024 é de 58,05%, superior à meta de IEC, que é de 38%, e cresce progressivamente até atingir 96,51% em 2060, superando a meta de 90% para esse ano. Nas áreas formais, o ICT também atende às metas, com valores variando de 53,27% em 2024 para 90,50% em 2060. As áreas informais apresentam um crescimento sólido, começando com 53,22% em 2024 e chegando a 93,71% em 2060, também superando a meta de universalização. No entanto, as áreas rurais mostram uma cobertura de tratamento extremamente baixa, com valores de apenas 1,85% em 2024, subindo para 28,31% em 2060, o que evidencia que essas áreas não alcançarão a universalização sem esforços adicionais significativos.

Por fim, os dados apresentados na Tabela 24 ressaltam que, enquanto as áreas formais e informais demonstram uma evolução consistente e atendem às metas de universalização

ao longo do período analisado, as áreas rurais permanecem como o maior desafio, com índices muito inferiores às metas estabelecidas tanto para coleta quanto para tratamento. Essa disparidade evidencia a necessidade de estratégias específicas e investimentos direcionados por parte da Sabesp para ampliar a cobertura de esgotamento sanitário em regiões rurais, garantindo equidade no acesso ao saneamento básico na BHRC (SILVA, 2022a; INSTITUTO TRATA BRASIL, 2025).

A Tabela 25 apresenta a comparação da extensão de redes previstas no Contrato de Concessão da Sabesp (SEMIL, 2024) versus a extensão da camada vetorial Redes a Implantar.

Tabela 25. Comparação de extensão prevista de rede coletora com extensão determinada.

Ano	Extensão prevista SEMIL (m)			Extensão determinada (m)		
	Recorte Formal	Recorte Informal	Recorte Rural	Recorte Formal	Recorte Informal	Recorte Rural
2025	8.000,00	13.500,00	NA	291.494,79	12.357,16	9.063,65
2026	55.000,00	500,00	NA	7.118,47	-	129,03
2027	40.000,00	500,00	NA	5.589,88	-	89,04
2028	35.000,00	500,00	NA	7.321,02	533,16	16,99
2029	15.000,00	500,00	NA	22.655,81	-	295,02
2033	45.000,00	1.500,00	NA	31.787,45	54,61	609,76
2040	30.000,00	1.000,00	NA	53.349,79	68,47	2.931,58
2050	50.000,00	500,00	NA	69.561,49	1.718,00	13.009,32
2060	20.000,00	1.500,00	NA	65.402,29	739,55	30.533,19

NA = não aplicável.

Fonte: Autoria própria.

A análise da Tabela 25 revela diferenças marcantes entre a extensão de redes coletoras prevista no Contrato de Concessão da Sabesp (SEMIL, 2024) e a extensão projetada pela camada vetorial Redes a Implantar para os recortes territoriais Formal, Favela e Rural. Enquanto o modelo apresenta valores significativamente maiores, especialmente nas áreas urbanas e nas áreas rurais, os números previstos pela SEMIL parecem não acompanhar a complexidade e a abrangência necessárias para atender as demandas reais da BHRC.

Observa-se que a extensão prevista no contrato de concessão não explicita, nos documentos consultados, a memória de cálculo associada, limitando a identificação das premissas e critérios técnicos utilizados para a definição desses valores.

Por exemplo, no recorte formal, a SEMIL estima a implantação de aproximadamente 8.000 metros de rede em 2025, enquanto o modelo desenvolvido nesta pesquisa projeta 291.494,79 metros. Essa diferença expressiva sugere que as estimativas contratuais podem não refletir integralmente a magnitude da expansão da rede coletora requerida para atender às condições simuladas.

De forma semelhante, as áreas rurais, não contempladas nas previsões da SEMIL, apresentam extensões relevantes nas simulações do modelo, como os 30.533,19 metros projetados para 2060. Ressalta-se, contudo, que em regiões rurais ou periurbanas o atendimento ao esgotamento sanitário pode ser viabilizado por meio de soluções individuais, como fossas sépticas, tanques de evapotranspiração e jardins filtrantes, alternativas compatíveis com essas condições territoriais (VON SPERLING, 2016).

No recorte informal (favelas), os valores estimados pelo modelo mostram maior proximidade em relação às projeções da SEMIL nos anos iniciais, porém passam a apresentar diferenças mais acentuadas nos períodos posteriores. Esse comportamento sugere que as projeções contratuais podem não incorporar integralmente a dinâmica de evolução e expansão dessas áreas ao longo do tempo (SENAR, 2019).

Os dados apresentados na Tabela 25 indicam que o modelo simulado fornece uma projeção mais detalhada e aderente às necessidades de infraestrutura da BHRC, enquanto as metas contratuais, ainda que consideradas nesta pesquisa, apresentam valores mais conservadores, sobretudo nos recortes Formal e Rural. Essa diferença sugere a necessidade de cautela na interpretação das metas para assegurar maior efetividade no planejamento voltado à universalização do saneamento

O uso de dados internos da Sabesp, provenientes de bases operacionais e cadastrais, constituiu um elemento central da pesquisa, ao permitir representar com maior precisão a configuração real do sistema de esgotamento sanitário e a evolução histórica da cobertura. Essas informações, geralmente restritas ao ambiente corporativo, forneceram uma base empírica consistente para a modelagem espacial e a validação dos resultados, assegurando que as simulações refletissem condições efetivas de operação. A incorporação de dados técnicos e georreferenciados da concessionária amplia a credibilidade e a aplicabilidade prática do estudo.

Para replicação de modelagens espaciais recomenda-se: (i) descrever o procedimento completo (preparo dos dados, grade espacial, lista e hierarquia das variáveis, parâmetros e matrizes de transição); (ii) validar com conjunto de métricas (concordância, comparação pixel a pixel e tabulações de acertos/erros); e (iii) delimitar o alcance de extrapolação (pressões antrópicas, instrumentos normativos e condições físicas) — recomendações convergentes em teses e artigos nacionais voltados à modelagem de uso e ocupação do solo (BUENO, 2023; VARNIER, 2024).

8 CONCLUSÃO

Os resultados confirmam que a metodologia proposta é eficaz na utilização de modelagem espacial e ferramentas de geotecnologia para simular o crescimento da cobertura de coleta e tratamento de esgoto na Bacia Hidrográfica do Rio Cotia (BHRC). Por meio de abordagens inovadoras e dados integrados, foi possível mapear com precisão a projeção da evolução das coberturas de coleta e de tratamento de esgoto, contribuindo significativamente para o planejamento estratégico do saneamento básico.

A análise do uso e ocupação do solo evidenciou mudanças significativas na BHRC entre 2002 e 2024, com aumento expressivo das áreas urbanas e declínio das áreas naturais, como pastagens e vegetação arbórea. Esses resultados mostram como o avanço da ocupação antrópica influencia diretamente a demanda por infraestrutura de saneamento, destacando a importância de políticas públicas integradas para mitigar os impactos ambientais e promover o desenvolvimento sustentável.

A validação das coberturas simuladas de coleta e de tratamento demonstrou a eficácia dos modelos empregados, especialmente o *Multi-Layer Perceptron* (MLP), que apresentou desempenho superior em relação aos outros métodos testados. A análise das taxas de acerto, erro e alarmes falsos ao longo dos anos reforçou a confiabilidade das previsões realizadas, embora com algumas limitações em períodos mais distantes.

A comparação entre a cobertura simulada e as metas estabelecidas indicou que a universalização poderá ser alcançada parcialmente antes do prazo, sobretudo nos recortes urbanos formais e informais (favelas). Entretanto, a modelagem evidenciou limitações nas áreas rurais, onde os índices de cobertura permanecem abaixo das metas legais, mostrando que, embora o conceito de universalização seja absoluto do ponto de vista normativo, na prática ele não se concretiza de forma integral no território da área de estudo, apontando a necessidade de maior atenção a essas regiões.

A robustez da modelagem espacial utilizada foi evidente ao longo de toda a pesquisa, permitindo projeções detalhadas e confiáveis até o horizonte de 2080. Contudo, a partir desse período, as simulações apresentaram limitações, em razão do aumento das incertezas inerentes aos dados e à variabilidade dos cenários futuros. Apesar disso, o modelo se mostrou uma ferramenta essencial para auxiliar na tomada de decisão e no planejamento estratégico do saneamento.

A análise reforçou que a universalização do Sistema de Esgotamento Sanitário (SES) na BHRC é uma meta viável, desde que sejam realizados os investimentos previstos e as obras necessárias sejam executadas em caráter acelerado para as áreas rurais. A expansão das redes de coleta e tratamento projetada atende aos requisitos legais e às demandas crescentes, alinhando-se aos objetivos do novo Contrato de Concessão da Sabesp.

Além dos aspectos técnico-operacionais abordados, é necessário reconhecer que a efetiva universalização do esgotamento sanitário depende de fatores externos ao controle da concessionária. Políticas públicas de uso e ocupação do solo, diretrizes de habitação, disponibilidade de financiamento e condições econômicas locais influenciam diretamente o ritmo de expansão e a sustentabilidade dos sistemas. Essas variáveis institucionais e socioeconômicas, embora não representadas na modelagem, interferem na viabilidade prática das metas de cobertura e devem ser consideradas na formulação de políticas integradas entre os setores de saneamento, planejamento urbano e gestão territorial.

Para estudos futuros, recomenda-se a utilização de outros modelos matemáticos para complementar as projeções e aumentar a precisão das análises. Além disso, a replicação dos pesos sinápticos do MLP em áreas com características semelhantes à BHRC pode oferecer novas ideias e aprimorar a modelagem em outras regiões. Por fim, a integração de dados mais recentes e de maior qualidade permitirá uma análise ainda mais detalhada, contribuindo para a universalização efetiva e sustentável do saneamento básico.

REFERÊNCIAS

ABRAHÃO, N. C. **Aplicações GIS para empresas de saneamento básico**. 1. ed. São Paulo: ABES, 2020.

ACHON, C. L. **Sistema de esgotamento sanitário: concepção, partes componentes e pós-uso**. Allevant.EDU, 2020. Disponível em: <https://allevanteducacao.com.br/wp-content/uploads/Cursos/DEFINITIVO-SISTEMAS-DE-ESGOTO-SANITARIO-MODULO-2/AULA-02-ESGOTO.pdf>. Acesso em: 14 jul. 2024.

AFTAB, B.; WANG, Z.; WANG, S.; FENG, Z. Application of a multi-layer perceptron and Markov chain analysis-based hybrid approach for predicting and monitoring LULCC patterns using random forest classification in Jhelum District, Punjab, Pakistan. **Sensors**, v. 24, n. 17, p. 5648, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/s24175648>.

ALBACH, C. A. S.; MOURA, R. R. Panorama dos objetivos de desenvolvimento sustentável no Brasil: reflexões a partir do acesso à água potável e saneamento básico. **Alemur**, v. 10, n. 2, p. 132–145, 2025.

ALMEIDA, L. M. W.; SEKI, J. T. P. Modelagem matemática como meio de integração do pensamento computacional na educação matemática. **Quadrante**, v. 33, n. 2, p. 267–291, 2024. DOI: <https://doi.org/10.48489/quadrante.36900>.

ARAGÃO, H. G. GisPerdas: a geographic information system to help water loss management. **Concilium**, v. 23, n. 22, 2023.

ARAUJO, L. C. G.; MOTA, A. M. S.; SILVA JÚNIOR, C. G.; VIEIRA, Z. C. Impactos das ligações clandestinas de esgoto nos canais de drenagem de Aracaju-SE. **RIMA**, v. 6, n. 1, 2024.

AREAL, P. V. V. **Novo Marco Legal do Saneamento Básico: uma análise a partir das concessões dos serviços de abastecimento de água e esgotamento sanitário realizados nos Estados de Alagoas, Amapá e Rio de Janeiro**. 2023. 181 f. Dissertação (Mestrado em Políticas Públicas) — Escola Nacional de Administração Pública, Brasília, 2023.

BERTONE, A. M. A.; BASSANEZI, R. C.; JAFELICE, R. S. M. **Modelagem matemática**. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2014. 191 p. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/25315/1/Modelagem%20Matem%C3%A1tica.pdf>. Acesso em: 30 out. 2024.

BNDES — BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. **BNDES Finem – Saneamento**. 2024. Disponível em: <https://www.bndes.gov.br/wps/portaL/site/home/financiamento/produto/bndes-finem-saneamento>. Acessado em 8 set. 2024.

BRASIL. Ministério das Cidades. **Modelo para cálculo de necessidades de investimentos – Caderno Temático 1**. Plansab: Plano Nacional de Saneamento Básico. Brasília, DF, 2023a. Disponível em: <https://www.gov.br/cidades/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/plano-nacional-de-saneamento-basico/plansab/arquivos/CadernoTematico11.pdf>. Acesso em: 8 set. 2024

BRASIL. **Decreto nº 11.598, de 19 de janeiro de 2023.** Estabelece normas para a comprovação da capacidade econômico-financeira dos prestadores de serviços públicos de saneamento básico e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 20 jan. 2023b.

BRASIL. **Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020.** Atualiza o marco legal do saneamento básico e altera a Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007, a Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000, e a Lei nº 10.768, de 19 de novembro de 2003. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2020.

BRASIL. **Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012 (Código Florestal).** Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2012.

BUENO, G. C. **Aplicação da estatística à modelagem hidrológica e à previsão de uso e ocupação do solo para o desenvolvimento de novas métricas de desempenho.** 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2023.

CACIATO, E. H. A.; SILVA FILHO, C. F.; BENEDICTO, S. C.; FERRARI, V. E.; MARIOSA, D. F.; CONTI, D. M.; BRANCHI, B. A.; GARCÍA, R. D. B. Comparative study of ESG practices among Brazilian sanitation companies. *Sustainability*, v. 17, n. 16, p. 7312, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/su17167312>.

CAPOBIANCO, J. P. R.; SANTOS, G. R.; CHECCO, G. B.; MENDES, A. T. **Saneamento básico no Brasil: perfil do investimento público para a universalização e promoção do direito humano à água.** Brasília: IPEA, 2024. 10 p. (Boletim Regional, Urbano e Ambiental).

CARNEIRO, T. G. S. **Nested-CA: a foundation for multiscale modeling of land use and land change.** 2006. 109 p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2006.

CEM — Centro de Estudo da Metrópole. **Base cartográfica digital georreferenciada de logradouros da Região Metropolitana de São Paulo – edição 2020.** São Paulo, 2020.

CLARK LABS. **Land Change Modeler in TerrSet.** 2024. Disponível em: <https://clarklabs.org/terrset/land-change-modeler>. Acesso em: 8 set. 2024.

CHUEIRI, D. M. A.; KLOTH, C. G.; PIACESI, P. A.; FORTUNATO, R. A. Desafios da gestão costeira na Ilha Grande – Rio de Janeiro: turismo e efluente sanitário — uma análise exploratória nas praias de Abraão e Aventureiro. *Open Science Research XIV*, p. 611–626, 2024. Disponível em: <https://downloads.editoracientifica.com.br/articles/240115482.pdf>. Acesso em: 12 nov. 2024.

COBRAPE — Companhia Brasileira de Projetos e Empreendimentos. **Modelo topológico e sua aplicação na estimativa da distribuição das vazões tratadas no sistema principal de esgotos da RMSP.** Processo Licitatório nº 04.557/2002. São Paulo: Sabesp, 2010

COSTA, N. R. Política pública de saneamento básico no Brasil: ideias, instituições e desafios no século XXI. **Ciência e Saúde Coletiva**, v. 28, n. 9, p. 2595–2600, 2023. Disponível em: <https://www.scielo.org/article/csc/2023.v28n9/2595-2600>. Acesso em: 15 out. 2025.

COSTA JÚNIOR, J. F.; CABRAL, E. L. S.; SOUZA, R. C.; BEZERRA, D. M. C.; SILVA, P. T. F. Um estudo sobre o uso da escala de Likert na coleta de dados qualitativos e sua correlação com as ferramentas estatísticas. **Contribuciones a las Ciencias Sociales**, v. 17, n. 1, p. 360–376, 2024. Disponível em: <https://ojs.revistacontribuciones.com/ojs/index.php/clcs/article/view/4009>. Acesso em: 15 out. 2025.

CRONBACH, L. J. Coefficient alpha and the internal structure of tests. **Psychometrika**, v. 16, n. 3, p. 297–334, 1951.

CRUZ, S. S. V.; ALAVES, F. J. C.; FIALHO, R. P. B.; SILVA, A. A. **Modelagem matemática – sabendo usar não vai faltar: a modelagem matemática no uso consciente da água**. Belém: Universidade do Estado do Pará, 2024. 27 p. Disponível em: <https://educapes.capes.gov.br/bitstream/capes/748479/1/Livro%20Sara%20Silva%20da%20Vera%20Cruz%20Modelagem.pdf>. Acesso em: 6 nov. 2024

CUSTÓDIO, A. M. B. **Desigualdade no acesso ao saneamento básico no Brasil: uma análise a partir das diferenças regionais e de situação do domicílio entre os anos de 2016 e 2022**. 2023. 134 f. Dissertação (Mestrado em Economia) — Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2023.

DE LIZ ARCARI, A.; TAVORA, J.; VAN DER WAL, D.; SALAMA, S. The Wastewater Contamination Index: A methodology to assess the risk of wastewater contamination from satellite-derived water quality indicators. **Frontiers in Environmental Science**, v. 11, art. 1130655, 2023.

DELANKA-PEDIGE, H. M. K.; MUNASINGHE-ARACHCHIGE, S. P.; ABEYSIRIWARDANA-ARACHCHIGE, I. S. A.; NIRMALAKHANDAN, N. Evaluating wastewater treatment infrastructure systems based on UN Sustainable Development Goals and targets. **Journal of Cleaner Production**, v. 298, p. 126795, 2021.

DIB, B. S.; CANHOTO, O. M. F.; MORAES, R. P. G.; SILVA, I. R. Saneamento básico: impactos ambientais causados pelo despejo de esgoto no Rio Negro (Amazonas–Brasil). **Research, Society and Development**, v. 11, n. 13, 2022.

DICKIN, S.; GABRIELSSON, S. Inequalities in water, sanitation and hygiene: challenges and opportunities for measurement and monitoring. **Water Security**, v. 20, art. 100143, 2023.

EASTMAN, J. R. **IDRISI Selva manual**. Worcester, MA: IDRISI Production — Clark University, 2012. 332 p.

ESRI. **ArcGIS Pro**. 2024. Disponível em: <https://www.esri.com/pt-br/arcgis/products/arcgis-pro/overview>. Acesso em: 15 out. 2024.

FERREIRA, J. G.; SOUZA, B. J. Desafios do cumprimento do ODS 6 no semiárido da Bacia Hidrográfica do Rio Apodi–Mossoró/RN. **GeoTextos**, v. 20, n. 1, p. 57–84, 2024.

FOLHARINI, S.; OLIVEIRA, R. Utilização do Land Change Modeler® na modelação prospetiva do uso e cobertura do solo na microrregião de Santos, Brasil para o ano de 2022. **Revista de Geografia e Ordenamento do Território (GOT)**, n. 19, p. 57–73, 2020. DOI: <https://doi.org/10.17127/got/2020.19.003>.

FRANCO, A. de O.; MOREIRA, J. G.; FARIAS, C.; SERRANO, R. O. P.; MESQUIRA, A. A.; PEREIRA, J. da S. Saúde e saneamento básico: algumas reflexões. **UÁQUIRI – Revista do Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Acre**, v. 6, n. 1, 2024.

GASIRABO, A.; XI, C.; HAMAD, B. R.; EDOVIA, U. D. A CA-Markov-based simulation and prediction of LULC changes over the Nyabarango River Basin, Rwanda. **Land**, v. 12, n. 9, 2023.

GHOSH, P.; HOSSAIN, M.; SARKAR, S. Inequality among social groups in accessing improved drinking water and sanitation in India: a district-level spatial analysis. **The Professional Geographer**, v. 75, n. 3, p. 361–382, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1080/00330124.2022.2124181>.

GLOBO. **Sabesp acelera expansão do saneamento após desestatização**. 2025. Disponível em: <https://valor.globo.com/conteudo-de-marca/sabesp/noticia/2025/07/31/sabesp-acelera-expansao-do-saneamento-apos-desestatizacao.ghml>. Acesso em: 18 dez. 2025.

HAWKER, L.; NEAL, J. **FABDEM v1-2**. Bristol: University of Bristol, 2021. Disponível em: <https://data.bris.ac.uk/data/dataset/25wfy0f9ukoge2gs7a5mqpq2j7>. Acesso em: 24 set. 2024.

HOFMANN, P.; CAPRIGLIONE, L.; CHICARINO, T.; PIMENTA, E. “So connected yet so distant”: integrated sanitation action in Campinas to meet the SDGs. **Urban Planning**, v. 10, 2025.

IBGE — Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Grade estatística: nota técnica**. Rio de Janeiro: IBGE, 2016. 31 p. Disponível em: https://geoftp.ibge.gov.br/recortes_para_fins_estatisticos/grade_estatistica/censo_2010/grade_estatistica.pdf. Acesso em: 26 set. 2024.

IBGE — Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Demográfico 2022: agregados por setores censitários preliminares — população e domicílios: resultados do universo: nota metodológica nº 02**. Rio de Janeiro: IBGE, 2024.

IGC — Instituto Geográfico e Cartográfico. **Carta topográfica**. São Paulo: Serviço Gráfico do IGC, 1979. Escala 1:10.000.

INSTITUTO TRATA BRASIL. **Avanços do Novo Marco Legal do Saneamento Básico no Brasil – 2024 (SNIS 2022)**. São Paulo: Instituto Trata Brasil, 2024. Disponível em: <https://tratabrasil.org.br/avancos-do-novo-marco-legal-do-saneamento-basico-no-brasil-2024-snis-2022/>. Acesso em: 8 set. 2024.

INSTITUTO TRATA BRASIL. **Distante do necessário: investimento em saneamento precisa mais do que dobrar para a universalização**. São Paulo: Instituto Trata Brasil, 2025. Disponível em: <https://tratabrasil.org.br/distante-investimento-saneamento-mais-dobrar>. Acesso em: 17 dez. 2025.

IPT — Instituto de Pesquisas Tecnológicas. **Plano diretor regional da sub-região do rio Cotia: caracterização regional**. Relatório Técnico nº 79.907-205. São Paulo, 2005.

ITO, A. H. **Otimização no traçado e dimensionamento de redes coletoras de esgoto sanitário**. 2023. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/003184833>. Acesso em: 18 dez. 2025.

JAMOVÍ — Jamovi Development Team. **Jamovi: about**. 2024. Disponível em: <https://www.jamovi.org/about.html>. Acesso em: 15 jul. 2024.

JAVARONI, S. L.; SOARES, D. S. Modelagem matemática e análise de modelos matemáticos na educação matemática. **Acta Scientiae**, v. 14, n. 2, p. 260–275, 2012.

KENDALL, M. G.; BABINGTON, B. S. The problem of m rankings. **The Annals of Mathematical Statistics**, v. 10, n. 3, p. 275–287, 1939.

KLIGERMAN, D. C.; ZANATTA, A. S.; TOLEDO, G. A.; NOGUEIRA, J. M. R. Path toward sustainability in wastewater management in Brazil. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 20, n. 16, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph20166597>.

KUMAR, S.; KUMAR, M.; KACKER, S. GIS mapping of high sewage areas in India and sustainable design of sewage disposal system. In: **Demystifying emerging trends in green technology**. Bentham Science Publishers, 2025. p. 55–64.

LIKERT, R. A technique for the measurement of attitudes. **Archives of Psychology**, v. 22, n. 140, p. 1–55, 1932.

LUIZ, C. H. P. **Modelagem da cobertura da terra e análise da influência do reflorestamento na transformação da paisagem: Bacia do Rio Piracicaba e Região Metropolitana do Vale do Aço**. 2014. 141 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

LUIZ, C. H. P.; STEIKEN, V. A. Análise e modelagem ambiental para simulação dos impactos do Código Florestal Brasileiro na estrutura da paisagem no DF. **Mercator**, v. 22, e22025, 18 p., 2023. Disponível em: <http://www.mercator.ufc.br/mercator/article/view/e22025a>. Acesso em: 8 nov. 2024.

MANENTI, V. D. **Modelagem do uso do solo e planejamento territorial da Região Carbonífera do Sul de Santa Catarina, Brasil**. 2019. 114 p. Dissertação (Mestrado em Geografia) — Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, SC, 2019. Disponível em: <http://200.18.15.28/bitstream/1/9119/1/Vanessa%20Dsgostim%20Manenti.pdf>. Acesso em: 23 fev. 2024.

MARTINS, D. S.; OTTONI, A. B. A participação dos comitês de bacia na regulação do saneamento básico de água e esgoto. **Brazilian Journal of Development**, v. 8, n. 1, p. 2517–2537, 2022. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv8n1-163>.

MEDEIROS, G. A.; TRESMONDI, A. C. C. L.; QUEIROZ, B. P. V.; FENGLER, F. H.; ROSA, A. H.; FIALHO, J. M.; LOPES, R. S.; NEGRO, C. V.; SANDOS, L. F.; RIBEIRO, A. I. Water quality, pollutant loads, and multivariate analysis of the effects of sewage discharges into urban streams of Southeast Brazil. **Energy, Ecology and Environment**, v. 2, p. 259–276, 2017.

METZGER, J. P.; ALVES, L. F.; GOULART, W.; TEIXEIRA, A. M. G.; SIMÕES, S. J. C.; CATHARINO, E. L. M. Uma área de relevante interesse biológico, porém pouco conhecida: a Reserva Florestal do Morro Grande. **Biota Neotropica**, v. 6, n. 2, 2006.

MICROSOFT. **Pacote Office 2016**. 2024. Disponível em: <https://www.microsoft.com/pt-br/microsoft-365/previous-versions/microsoft-office-2016>. Acesso em: 23 set. 2024.

MIKI, M. K.; CHEN, G.; VAN LOOSDRECHT, M. C. M.; EKAMA, G. A.; BRDJANOVIC, D. **Tratamento biológico de esgoto: princípios, modelagem e projeto**. 2. ed. Londres: IWA Publishing, 2022. 1012 p.

MOURA, F. G.; TONIOLO, B. P.; SILVEIRA, G. M.; BEVILACQUA, N. Análise espacial da cobertura de tratamento de esgoto na Grande São Paulo: enfoque no planejamento técnico da Sabesp. In: 36º Congresso Nacional de Saneamento e Meio Ambiente. **Anais eletrônicos**. 2025. 14 p.

NEXTGIS. **MOLUSCE — land cover changes analysis in QGIS**. 2024. Disponível em: <https://nextgis.com/molusce/>. Acesso em: 16 nov. 2024.

NUVOLARI, A. **Esgotamento sanitário: coleta, tratamento e reuso agrícola**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2011. 562 p.

OLIVEIRA, A. K. B. **Proposta de metodologia de simulação integrada das redes urbanas de drenagem pluvial e esgotamento sanitário**. 2022. 250 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.

PAULO, P. L.; SOUZA, H. H. S.; LIMA, P. M.; MAGALHÃES FILHO, J. C.; MAGRI, M. E. Nota técnica 5 – uso e disposição segura de esgoto doméstico, água cinza e excretas: a abordagem do Plano de Segurança do Saneamento da Organização Mundial da Saúde. **Cadernos Técnicos de Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 2, n. 5, p. 63–73, 2022.

PAVÃO, M. **Modelagem e análise de mudanças do uso e cobertura da terra no entorno de áreas protegidas: o caso do Parque Estadual da Cantareira – São Paulo**. 2017. 145 f. Tese (Doutorado em Geografia) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

PAZ, M. G. A.; FRACALANZA, A. P.; ALVES, E. M.; SILVA, F. J. R. Os conflitos das políticas da água e do esgotamento sanitário: que universalização buscamos? **Estudos Avançados**, v. 35, n. 102, 2021.

PEIXOTO, F. S.; OLIVEIRA, J. P.; SANTOS, H. D. C. O esgotamento sanitário e a expansão urbana em Mossoró/RN. **Sociedade e Território**, v. 33, n. 2, 2021. Disponível em: <https://periodicos.ufrn.br/sociedadeeterritorio/article/view/23413/15259>. Acesso em: 5 abr. 2024

PINHEIRO NETO, V. R.; TIBÚRCIO, I. M.; BELLO, R. K. S.; SILVEIRA, N. T.; CAMPELO, S. H.; GALVÍNCIO, J. D. Análise do uso e ocupação do solo na Bacia Hidrográfica do rio Moxotó (Pernambuco). **Revista Brasileira de Sensoriamento Remoto**, v. 5, n. 3, p. 71–78, 2024. Disponível em: <https://rbsr.com.br/index.php/RBSR/article/view/189/88>. Acesso em: 16 set. 2024.

PMSP — Prefeitura Municipal de São Paulo. **Plano Municipal de Saneamento Básico de São Paulo**. São Paulo: PMSP, 2019. 122 f.

QGIS. **QGIS Development Team. QGIS Geographic Information System**. Open Source Geospatial Foundation Project, 2024. Disponível em <<http://qgis.osgeo.org>>. Acessado em 24 set. 2024.

QIN, M.; XIE, Y.; HUA, S.; LIU, Z.; GAO, P. Are ROC-improved logistic regressions beneficial to statistical models of land change? A counter example. **Annals of GIS**, v. 31, n. 4, p. 585–605, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1080/19475683.2025.2523736>.

ROCHA, P. I. O. **Modelagem da expansão urbana futura como suporte ao planejamento e ao ordenamento territorial para a cidade de João Pessoa – PB**. 2023. 82 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) — Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/30499>. Acesso em: 12 nov. 2024.

ROSSI, J. Saneamento e favela: marcas da desigualdade espacial no Rio de Janeiro. **História, Natureza e Espaço**, v. 13, n. 2, 2024.

SÃO PAULO (Estado). **Relatório nº 88.219-205 – Plano de Desenvolvimento e Proteção Ambiental da Bacia do Rio Cotia: caracterização regional**. São Paulo: Drenatec Engenharia S/C Ltda.; Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), 2007.

SABESP — Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo. **Servidor do planejamento de expansão: mancha de tratamento da Região Metropolitana – modelo topológico (setembro de 2023)**. São Paulo, 2023. 1 mapa: 118,9 × 84,1 cm. Escala 1:50.000.

SABESP — Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo. **Relatório de sustentabilidade 2023**. São Paulo: Sabesp, 2024a. 187 p. Disponível em: https://www.sabesp.com.br/site/uploads/file/relatorios_sustentabilidade/relatorio_sustentabilidade_2023.pdf. Acesso em: 7 nov. 2024.

SABESP — Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo. **NTS 0292 – elaboração de cadastro técnico digital**. São Paulo: Sabesp, 2024b. 28 p. Disponível em: <https://normastecnicas.sabesp.com.br/>.

SABESP — Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo. **Servidor do planejamento de expansão: relatórios gerenciais e camadas vetoriais de informações**

empresariais – memorando da Superintendência de Oeste (OO). São Paulo, 2024c. 250 p.

SABESP — Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo. **Relatório de sustentabilidade 2024.** São Paulo: Sabesp, 2025. 186 p. Disponível em: <https://www.sabesp.com.br/site/toq/x/y/relatorio-sustentabilidade-2024.pdf>. Acesso em: 12 dez. 2025.

SALLES, M. J. **Política nacional de saneamento: percorrendo caminhos em busca da universalização.** 2009. 185 f. Tese (Doutorado em Saúde Pública) — Escola Nacional de Saúde Pública Sergio Arouca, Rio de Janeiro, 2009.

SALVADOR, J. A.; ARENALES, S. **Modelagem matemática ambiental.** 1. ed. São Carlos: EdUFSCar, 2022. 245 p.

SANTOS, T. A.; MORAES, L. R. S. Racismo ambiental no acesso ao serviço público de abastecimento de água. **Revista da ABPN**, v. 14, p. 73–94, 2022.

SECOM — Secretaria de Comunicação do Estado de São Paulo. **Governo de SP conclui desestatização da Sabesp com recordes e benefícios imediatos à população.** 2024. Disponível em: <https://www.parceriaseminvestimentos.sp.gov.br/governo-de-sp-conclui-desestatizacao-da-sabesp-com-recordes-e-beneficios-imediatos-a-populacao/>. Acesso em: 30 dez. 2024.

SEMIL — Secretaria de Meio Ambiente, Infraestrutura e Logística do Estado de São Paulo. **Desestatização Sabesp – documentação pós-consulta.** 2024. Disponível em: <https://semil.sp.gov.br/desestatizacaosabesp/documentacao/>.

SEMIL — Secretaria de Meio Ambiente, Infraestrutura e Logística do Estado de São Paulo. **URAE-1 Sudeste.** 2025. Disponível em: <https://semil.sp.gov.br/urae1/urae-1/>. Acesso em: 3 fev. 2025.

SENAR — Serviço Nacional de Aprendizagem Rural. **Saúde: saneamento rural.** 2019. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/ceplac/informe-aocacaucultor/manejo/cartilhas-senar/226-saude-saneamento-rural.pdf>. Acesso em: 2 fev. 2025.

SHROUT, P. E.; FLEISS, J. L. Intraclass correlations: uses in assessing rater reliability. **Psychological Bulletin**, v. 86, n. 2, p. 420–428, 1979.

SILVA, D. S. **A efetivação de políticas públicas no âmbito da universalização e da modicidade tarifária nos serviços públicos de abastecimento de água potável e esgotamento sanitário.** 2022. Dissertação (Mestrado em Direito) — Universidade Estadual Paulista, Franca, 2022a.

SILVA, R. A. Avaliação do atendimento às políticas de serviços de água e esgoto do município de Rio das Ostras (RJ) em comparação ao cenário nacional. **Boletim do Observatório Ambiental**, v. 16, n. 2, 2022b.

SILVA, F. C.; CHAVES, A. F. F.; MORAES, V. M. C.; LESSA, R. J. O.; DOURADO JÚNIOR, O. C. Correlação entre saneamento básico e vulnerabilidade à pandemia de covid-19 no Brasil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 28, e20220145, 2023a.

SILVA, J. H. B.; DUARTE, R. M.; FLORES, T. K. S.; JUNIOR, J. S. S.; VILLANUEVA, J. M. M. Modelagem de um sistema de abastecimento de água baseado em redes neurais artificiais. **Proceedings SBAI 2023 e SBSE 2023**, v. 1, n. 2, 2023b.

SILVA, L. C. N.; BACANI, V. M. Simulação de cenários de fragilidade ambiental na Bacia Hidrográfica do Rio da Prata, MS, utilizando o modelo de cadeias de Markov e autômatos celulares. **Geosul**, v. 38, n. 85, p. 184–206, 2023c. Disponível em: <https://periodicos.ufsc.br/index.php/geosul/article/view/87208/52875>. Acesso em: 17 nov. 2024.

SNIS — Sistema Nacional de Informações sobre o Saneamento. **Diagnóstico temático serviços de água e esgoto – visão geral: ano de referência 2022**. 2023. Disponível em: https://www.gov.br/cidades/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis/produtos-do-snis/diagnosticos/DIAGNOSTICO_TEMATICO_VISAO_GERAL_AE_SNIS_2023.pdf. Acesso em: 14 nov. 2024.

SOARES FILHO, B. S. **Modelagem dinâmica de paisagem de uma região de fronteira de colonização amazônica**. 1998. 299 f. Tese (Doutorado em Engenharia) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

SOLVED. **Avaliação e métricas de acurácia – sensoriamento remoto**. 2024. Disponível em: <https://solved.eco.br/avaliacao-de-acuracia-ou-concordancia/>. Acesso em: 10 dez. 2024.

TONIOLO, B. P. Análise de indicadores de saneamento básico e densidade populacional na Unidade de Negócio Oeste Sabesp. **Revista DAE**, v. 68, n. 221, p. 42–52, 2020a.

TONIOLO, B. P. **Metodologia de avaliação de degradação ambiental utilizando técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto na Bacia Hidrográfica do Rio Cotia – SP**. 2020. 123 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) — Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 2020b.

TONIOLO, B. P.; PAIXÃO, A. M.; ABRAHÃO, N. C.; SIMAS, I. T. H.; SILVA, D. C. C.; COSTA, E. S. Sistematização de processo de gestão para cadastro técnico de empreendimentos imobiliários: estudo de caso na Sabesp Oeste. In: 38º Congresso Brasileiro de Manutenção e Gestão de Ativos. **Anais eletrônicos**. 2023a.

TONIOLO, B. P.; BOCATO, B. H.; SIMAS, I. T. H.; SILVA, D. C. C.; LOURENÇO, R. W. Análise e automatização em SIG como opção para mapeamento de lançamentos potenciais de sistema de esgotamento – etapa I. In: Workshop Internacional Sustentare e Wipis 2023. **Anais eletrônicos**. 2023b. 18 p.

TONIOLO, B. P.; SILVA, D. C. C.; LOURENÇO, R. W. Evolução da área de cobertura de esgotamento sanitário da Bacia Hidrográfica do Rio Cotia – SP. In: Workshop Internacional Sustentare e Wipis 2024. **Anais eletrônicos**. 2024a. 16 p.

TONIOLO, B. P.; BOCATO, B. H.; SILVA, R. C.; SILVA, D. C. C.; LOURENÇO, R. W. Análise e automatização em SIG como opção para mapeamento de lançamentos potenciais de sistema de esgotamento – etapa II. In: 35º Congresso Nacional de Saneamento e Meio Ambiente. **Anais eletrônicos**. 2024b. 16 p.

VAN PUIJENBROEK, P. J. T. M.; BEUSEN, A. H. W.; BOUWMAN, A. F.; AYERI, T.; STROKAL, M.; HOFSTRA, N. Quantifying future sanitation scenarios and progress towards SDG targets in the shared socioeconomic pathways. **Journal of Environmental Management**, v. 346, 2023.

VARNIER, M. **Avaliação de modelos de predição de mudanças de uso do solo em três biomas brasileiros**. 2024. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2024.

VERBUG, P. H.; VELDKAMP, W. S. A.; ESPALDON, R. L. V.; MASTURA, S. S. A. Modeling the spatial dynamics of regional land use: the CLUE-S model. **Environmental Management**, v. 22, n. 3, p. 391–405, 2002.

VIEIRA, M. S. V.; VALÉRIO FILHO, M.; MENDES, R. M. Challenges and reality of sanitary sewage services in subnormal agglomerates in the State of São Paulo. **Scientific Journal of Applied Social and Clinical Science**, v. 4, n. 15, 2024a.

VIEIRA, M. S. V.; VALÉRIO FILHO, M.; MENDES, R. M. Desigualdades no saneamento de pequenas cidades de uma região metropolitana. **Geografia (Londrina)**, v. 34, n. 1, p. 109–129, 2024b.

VON SPERLING, M. **Princípios básicos do tratamento de esgotos**. 2. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2016. 211 p. ISBN 9788542301748.

WERNER, D.; HIRT, C. Neoliberalização dos serviços públicos: o papel do BNDES no saneamento básico pós-2000. **Urbe: Revista Brasileira de Gestão Urbana**, v. 13, e20200078, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/2175-3369.013.e20200078>.

ZILIOTTO, M. Environmental sanitation in Porto Alegre city, Brazil. **Sustainability**, v. 16, n. 7, art. 2672, 2024.

APÊNDICES

APÊNDICE A – ELABORAÇÃO DO QUESTIONÁRIO EM ESCALA LIKERT

O questionário teve como objetivo avaliar o grau de importância das variáveis explanatórias utilizadas na modelagem da expansão do Sistema de Esgotamento Sanitário (SES) na Bacia Hidrográfica do Rio Cotia (BHRC). Os resultados foram empregados para definir o conjunto final de variáveis inseridas no modelo preditivo desenvolvido no *Land Change Modeler* (LCM) do software TerrSet.

Foram consultados 35 especialistas em saneamento básico com atuação direta ou indireta na Sabesp, distribuídos em treze eixos de experiência: Água, Cadastro Técnico, Comercial, Eletromecânica, Esgoto, Geoprocessamento, Manutenção, Obras, Orçamento, Planejamento, Regulação e Tratamento de Esgoto (Tabela 26). Essa diversidade de perfis conferiu ao questionário um caráter multidisciplinar, assegurando diferentes perspectivas técnicas e operacionais sobre o processo de expansão do SES.

Tabela 26. Características dos especialistas.

Esp.	Formação	Experiência	Esp.	Formação	Experiência
01	Engenheiro Civil	Esgoto	19	Tecnólogo em hidráulica	Esgoto
02	Engenheiro Civil	Água	20	Técnico em saneamento	Tratamento de esgoto
03	Topógrafo	Esgoto	21	Técnico em saneamento	Cadastro técnico
04	Tecnólogo em mecânica	Eletromecânica	22	Engenheiro civil	Obra
05	Engenheiro Civil	Planejamento	23	Engenheira civil	Orçamento
06	Tecnólogo em mecânica	Projeto	24	Engenheiro mecânico	Esgoto
07	Geólogo	Geoprocessamento	25	Engenheiro civil	Obra
08	Técnico de saneamento	Esgoto	26	Psicologia	Regulação
09	Administradora	Orçamento	27	Engenheiro civil	Regulação
10	Engenheiro sanitário	Planejamento	28	Engenheiro civil	Orçamento
11	Engenheiro civil	Obra	29	Administração	Comercial
12	Técnico de gestão	Manutenção	30	Tecnólogo em edifícios	Água
13	Engenheiro civil	Água	31	Engenheiro civil	Cadastro técnico

Esp.	Formação	Experiência	Esp.	Formação	Experiência
14	Bióloga	Tratamento de esgoto	32	Engenheira de produção	Comercial
15	Engenheira civil	Planejamento	33	Engenheiro ambiental	Geoprocessamento
16	Engenheiro civil	Geoprocessamento	34	Técnico em edificações	Projetos
17	Engenheira química	Tratamento de esgoto	35	Técnico em saneamento	Projetos
18	Engenheiro de produção	Manutenção			

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 27 descreve com mais detalhes as dozes classes de experiência dos especialistas.

Tabela 27. Detalhamento das experiências.

nº	Área de experiência	Descrição da contribuição típica para o questionário
1	Água	Profissionais focados na operação do sistema de abastecimento.
2	Esgoto	Profissionais focados na operação do sistema de coleta de esgoto.
3	Cadastro técnico	Profissionais responsáveis pela atualização cadastral e gestão de dados de rede no SIG corporativo da Sabesp, denominado SIGNOS.
4	Geoprocessamento	Profissionais que trabalham com análise espacial, SIGNOS e modelagem territorial, focando em variáveis geográficas.
5	Eletromecânica	Engenheiros e técnicos ligados à automação, controle e operação de elevatórias e estações de tratamento.
6	Obras	Envolvidos em implantação de infraestrutura, avaliando viabilidade técnica e interferências construtivas.
7	Manutenção	Técnicos operacionais que conhecem a realidade das redes e os pontos críticos de falha e intervenção do SES.
8	Tratamento de esgoto	Especialistas em ETES, com foco em desempenho, vazões e condicionantes ambientais.
9	Planejamento	Profissionais de planos diretores, cenários de universalização e priorização de investimentos.
10	Orçamento	Responsáveis por estimativas de custos e análises de viabilidade econômico-financeira.
11	Comercial	Atuam em cadastro de clientes e faturamento, relacionando cobertura e demanda de atendimento.
12	Regulação	Técnicos voltados a indicadores e metas regulatórias, oferecendo visão estratégica de conformidade.
13	Projeto	Engenheiros e projetistas envolvidos em concepção e dimensionamento de sistemas coletores e interceptores. Avaliam a importância de variáveis físicas e topográficas.

Fonte: Autoria própria.

O questionário foi aplicado de forma virtual, por meio da plataforma Google Forms, contendo 31 variáveis explanatórias inicialmente selecionadas a partir da experiência do autor (Tabela 28), todas com a possibilidade de serem especializadas.

Tabela 28. Descrição das variáveis explanatórias.

Nº	Variável	Observação
1	Consumo de água	Indica o grau de ocupação e atividade residencial/comercial. Áreas com maior consumo tendem a ter infraestrutura consolidada e maior probabilidade de expansão do esgoto.
2	Declividade do terreno	Terrenos muito inclinados encarecem e dificultam a implantação de redes coletoras por gravidade, influenciando o traçado e a viabilidade técnica.
3	Densidade demográfica	Representa o adensamento urbano. Regiões densas são priorizadas por concentrarem mais ligações por extensão de rede, otimizando investimentos.
4	Proximidade de ocorrência de manutenção em rede	Áreas com histórico de manutenções recorrentes indicam redes obsoletas e defeituosas que precisam ser renovadas.
5	Proximidade de unidades não atendidas	Representa os imóveis que não são cobertos pelo SES, ou seja, não existe rede coletora disponível na frente do domicílio.
6	Proximidade de áreas de expansão	Identifica regiões estratégicas pela Sabesp para crescimento nas concepções, antecipando futuras demandas de infraestrutura.
7	Proximidade de Estação de Tratamento de Esgoto (ETE)	Reflete a facilidade de conexão a sistemas existentes; quanto mais próxima da ETE, menor o custo e maior a prioridade de atendimento.
8	Proximidade de Estação de Elevatória de Esgoto (ETE)	Influencia o limite operacional das redes por gravidade e o custo energético de bombeamento; áreas próximas a EEE têm viabilidade ampliada.
9	Proximidade de rede coletora existente	Principal variável física de expansão: áreas próximas a redes existentes são naturalmente prioritárias para extensão do sistema.
10	Proximidade de rede de água existente	Indica urbanização consolidada; frequentemente, a expansão do esgoto acompanha a rede de abastecimento.
11	Proximidade de empreendimentos imobiliários não atendidos	Representa novos polos de demanda, especialmente condomínios e loteamentos, pressionando por ampliação do atendimento.
12	Proximidade vias e núcleos urbanos	Reflete a densidade de infraestrutura e a facilidade logística de execução de obras.
13	Proximidade de hidrografia	Áreas próximas a corpos d'água são críticas para controle de poluição difusa; maior prioridade de interceptação de efluentes.
14	Transição de uso e ocupação do solo (2002-2024)	Representa o avanço urbano no período analisado; identifica zonas de expansão onde o esgoto tende a acompanhar o crescimento populacional.
15	Custo de universalização do Sistema de Esgotamento Sanitário	Estima o esforço financeiro necessário para cobertura de coleta e tratamento; áreas com custo menor por ligação são priorizadas.
16	Vazão de esgoto não tratado	Indica o volume de efluentes lançados sem tratamento, servindo como indicador de urgência ambiental e técnica.
17	Proximidade de lançamento de efluente	Identifica pontos de lançamento de esgoto não tratado; áreas próximas tendem a ser priorizadas para mitigação de impactos ambientais.

Nº	Variável	Observação
18	Profundidade de lençol freático	Influencia diretamente o custo e a técnica de escavação; áreas com lençol raso exigem soluções específicas, como rebaixamento.
19	Tipo de solo (permeabilidade)	Impacta a estabilidade e o custo das obras; solos muito permeáveis ou argilosos afetam a durabilidade da rede.
20	Renda per capita	Reflete desigualdades socioespaciais; pode indicar vulnerabilidade e necessidade de priorização social.
21	Proximidade de áreas de risco e de proteção	Áreas sujeitas a alagamentos, erosão ou deslizamentos de terra, assim como zonas de proteção ambiental, tendem a ter restrições construtivas, afetando a expansão direta do sistema.
22	Proximidade de edificações públicas	Essas edificações geram grandes vazões e podem demandar soluções pontuais de coleta e tratamento, além de terem prioridade na operação do serviço em caso de emergências.
23	Proximidade de favelas	Aponta regiões com limitações legais ou fundiárias, nas quais o atendimento depende de regularização.
24	Proximidade de captações (poços e nascentes)	Relevante para proteção de mananciais; afeta a priorização de interceptação de esgoto para evitar contaminação.
25	Coeficiente de escoamento superficial	Relaciona-se à impermeabilização e à urbanização; áreas com alto coeficiente indicam maior densidade e potencial de atendimento.
26	Material da rede coletora	Determina a durabilidade e o tipo de manutenção requerida; influencia decisões de substituição e ampliação.
27	Diâmetro da rede coletora	Afeta a capacidade de atendimento e a possibilidade de expansão; redes subdimensionadas limitam novas ligações.
28	Idade da rede coletora	Redes antigas podem exigir reabilitação antes da expansão; indicador de prioridade para renovação e manutenção.
29	Profundidade da rede coletora	Impacta o custo de extensão e de conexão de novas áreas; redes profundas são mais caras de prolongar.
30	Proximidade de indústrias	Zonas industriais geram alta carga poluidora e requerem sistemas específicos; influenciam o planejamento do tratamento.
31	Zoneamento ambiental municipal	Define restrições legais e áreas prioritárias para saneamento; influencia diretamente a viabilidade territorial da expansão.

Fonte: Autoria própria.

No questionário foi adotada a Escala de Likert, tipo “importância”, com sete níveis de resposta: 1 corresponde a nenhuma importância, 2 corresponde a uma importância muito baixa, 3 corresponde a uma importância baixa, 4 corresponde a uma importância moderada, 5 corresponde a uma importância alta, 6 corresponde a uma experiência muito alta e 7 corresponde a uma nota extremamente importante.

Optou-se pela utilização da escala de Likert de 7 pontos por sua adequação à natureza perceptiva e comparativa da análise, permitindo captar de forma quantitativa o grau de importância atribuído por cada especialista às variáveis preditoras. A escala adotada equilibra simplicidade de aplicação e sensibilidade analítica, sendo amplamente empregada em pesquisas de engenharia, planejamento e modelagem espacial. Sua estrutura ordinal possibilita a aplicação de métricas estatísticas (médias, desvios e índices de concordância), assegurando robustez e reprodutibilidade aos resultados (LIKERT, 1932; COSTA JÚNIOR et al., 2024).

As variáveis foram hierarquizadas conforme a média aritmética ($\bar{x}$) das respostas obtidas. Foram incorporadas às simulações apenas as variáveis com $\bar{x} \geq 4,0$, consideradas relevantes ou mais importantes. Variáveis com médias inferiores foram descartadas.

Foram aplicados três indicadores sobre a resposta do questionário para analisar estatisticamente a concordância interavaliadores e a consistência dos valores, que são: Alfa de Cronbach (α), *Intraclass Correlation Coefficient* (ICC – Coeficiente de Correlação Intraclass) e Coeficiente de Concordância de Kendall (W).

De acordo com Cronbach (1951), o alfa de Cronbach mede a consistência interna do questionário — ou seja, o quanto as respostas dos especialistas são coerentes entre as variáveis avaliadas. Valores altos indicam que os avaliadores compreenderam o instrumento de forma uniforme, e que as variáveis medem aspectos relacionados de um mesmo construto (importância na expansão do SES). A interpretação adota foi: $\alpha \geq 0,70 \rightarrow$ boa consistência; $\alpha \geq 0,80 \rightarrow$ muito boa; $\alpha \geq 0,90 \rightarrow$ excelente.

Segundo Shrout e Fleiss (1979), o ICC quantifica o grau de concordância entre diferentes avaliadores que julgam os mesmos itens. No presente estudo, expressa o quanto os 33 especialistas atribuíram notas semelhantes às mesmas variáveis na escala 1–7. A interpretação adota foi: $ICC \leq 0,50 \rightarrow$ concordância fraca; $ICC \leq 0,75 \rightarrow$ moderada; $ICC \leq 0,90 \rightarrow$ boa; $ICC > 0,90 \rightarrow$ excelente.

Por fim, o coeficiente W de Kendall é utilizado quando os respondentes classificam ou ranqueiam itens, medindo o grau de concordância ordinal. Ainda que a escala Likert produza dados numéricos, a análise de W pode complementar a avaliação da consistência de ordenação das variáveis por importância (KENDAL e BABINGTON, 1939). A interpretação adota foi: $W \leq 0,40 \rightarrow$ baixa concordância; $W \leq 0,60 \rightarrow$ moderada; $W \leq 0,80 \rightarrow$ boa; $W > 0,80 \rightarrow$ excelente.

A Tabela 29 apresenta os três indicadores estatísticos.

Tabela 29. Indicadores de avaliação estatística do questionário.

Indicador	Equação	Observação
Alfa de Cronbach (α)	$\alpha = \frac{k}{k-1} \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^k \sigma_i^2}{\sigma_t^2} \right)$	Onde: k = número de variáveis avaliadas; σ_i^2 = variância de cada variável; σ_t^2 = variância total do somatório das pontuações.
Coefficiente de Correlação Intraclass (ICC)	$ICC = \frac{MS_R - MS_E}{MS_R + (k-1) \times MS_E}$	Onde: MS_R = média dos quadrados entre os avaliadores; MS_E = média dos quadrados do erro residual; k = número de variáveis avaliadas.
Coefficiente de Concordância de Kendall (W)	$W = \frac{12S}{m^2(n^3 - n)}$	Onde: $S = \sum_{j=1}^n x (R_j - \bar{R})^2$; R_j = soma dos postos atribuídos à variável j ; $\bar{R}$ = média dos postos, m = número de avaliadores; n = número de variáveis.

Fonte: Cronbach (1951), Shrout e Fleiss (1979) e Kendal e Babington (1939).

APÊNDICE B – RESULTADOS SOBRE O QUESTIONÁRIO

A Tabela 30 apresenta a matriz de resultados do questionário da escala Likert.

Tabela 30. Resultados do questionário escala Likert.

Es pe c. nº	Variável Explanatória (nº)																																				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37
1	5	5	4	5	6	6	7	6	7	6	3	4	5	7	6	5	6	2	4	2	1	3	2	3	1	3	4	4	4	1	1						
2	7	5	4	4	6	6	5	4	7	7	5	4	5	7	3	4	5	7	3	1	2	3	2	7	2	3	3	3	3	1	1						
3	4	6	3	6	4	5	7	5	7	6	4	5	4	6	1	6	6	3	2	2	3	3	5	2	1	5	5	5	6	1	1						
4	4	4	3	5	4	3	6	7	6	6	4	3	4	6	4	4	3	3	1	2	2	2	3	1	2	1	1	1	1	1	1						
5	5	4	7	3	7	7	5	4	7	7	5	4	5	7	7	5	4	5	3	5	4	4	4	4	3	2	2	2	2	2	2	4					
6	6	5	5	3	5	5	5	5	6	7	4	4	4	7	5	4	3	4	3	3	3	3	2	3	2	4	3	2	3	2	3						
7	5	4	6	2	4	5	4	4	4	5	1	6	7	7	3	3	7	3	6	4	7	3	4	6	5	1	1	1	1	5	6						
8	4	5	4	4	5	4	7	6	7	5	4	4	5	6	5	6	5	2	2	2	3	1	3	2	1	3	3	3	3	2	2						
9	5	4	6	3	6	7	5	5	6	6	5	4	5	7	7	4	5	3	2	4	4	4	4	3	4	1	1	1	1	3	4						
10	6	5	5	1	6	7	5	5	6	5	3	4	7	7	3	6	7	3	3	6	6	5	5	6	5	2	2	2	2	5	7						
11	3	4	4	5	4	4	5	5	7	6	4	3	3	6	3	4	3	2	2	2	2	2	2	1	2	3	3	3	3	1	2						
12	4	5	4	7	4	4	4	4	7	5	5	2	3	6	3	5	3	1	1	1	1	3	2	2	1	3	3	3	5	2	3						
13	6	5	5	4	5	5	6	6	7	6	4	5	5	7	4	5	4	4	2	2	4	2	2	3	2	4	4	4	4	1	3						
14	5	4	4	3	6	5	7	6	7	6	4	2	6	6	3	7	6	4	1	2	3	3	1	5	1	1	2	1	2	2	2						
15	4	4	7	2	7	6	5	5	7	6	5	3	5	7	6	5	4	3	3	5	4	5	3	3	4	2	1	2	3	3	4						
16	4	4	5	2	4	4	6	6	7	5	3	4	4	7	4	4	3	2	2	3	2	2	2	2	2	1	2	1	2	1	3						
17	5	5	5	4	5	5	7	6	6	6	4	4	5	6	3	6	6	3	3	2	1	3	2	3	2	2	1	2	1	1	1						
18	4	4	5	7	3	3	6	7	7	6	4	4	3	6	4	6	4	1	2	1	2	2	3	1	1	2	1	2	3	2	1						
19	5	5	5	6	4	4	6	5	7	6	5	4	5	7	2	5	4	3	3	2	2	3	1	3	2	2	2	2	4	2	2						
20	6	5	5	4	4	4	7	5	7	6	4	4	6	6	3	7	6	4	2	3	3	2	2	3	1	1	1	1	2	1	2						
21	3	4	4	5	3	3	5	5	6	6	3	4	2	5	2	3	2	1	1	2	1	2	1	1	5	6	5	5	1	1							
22	4	5	4	4	4	5	5	5	7	6	4	3	4	6	3	4	3	3	3	3	2	3	3	2	2	2	1	2	1	1	2						
23	4	4	5	3	5	5	5	4	7	7	4	3	4	7	4	3	3	2	3	2	2	3	3	3	2	1	1	1	1	1	2						
24	5	5	4	5	6	5	7	6	7	6	4	4	4	7	4	4	4	3	3	2	2	2	2	3	3	5	3	4	4	2	2						
25	5	4	5	6	5	4	7	6	6	6	5	4	4	6	3	4	3	2	3	4	3	5	2	3	3	2	2	2	2	2	2						
26	3	4	6	2	7	6	4	3	6	7	3	3	6	7	6	2	3	1	1	5	2	5	4	2	3	1	1	1	1	3	4						
27	4	5	6	4	7	7	5	3	7	7	3	4	6	7	5	3	4	2	2	1	3	6	3	3	2	2	2	2	2	3	4						
28	4	4	5	4	4	5	5	5	6	6	4	3	3	7	3	4	4	3	3	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2						
29	4	3	4	3	6	5	4	4	5	5	6	4	3	6	4	3	2	2	1	3	3	4	3	1	2	1	1	1	1	5	4						
30	5	4	5	5	5	5	6	5	7	6	5	5	3	7	5	4	4	3	3	1	4	2	1	2	3	2	2	2	3	1	1						
31	5	5	6	4	5	6	6	6	7	7	4	4	5	7	7	4	5	4	2	3	2	2	1	2	1	1	1	1	1	1	5						
32	4	4	4	3	6	5	5	4	6	5	5	3	4	6	5	3	3	2	1	4	3	4	2	2	1	2	2	2	2	6	4						
33	4	4	5	2	7	7	5	3	5	7	2	5	7	7	3	6	7	1	3	3	6	5	2	5	5	1	1	1	1	7	6						
34	4	5	4	4	4	5	5	4	7	4	4	4	4	6	2	3	2	2	4	1	1	2	1	2	2	3	3	3	4	2	3						
35	3	5	4	4	4	5	5	6	7	5	4	4	4	6	3	3	4	2	3	1	1	1	2	2	2	2	4	3	3	2	3						
Méd ia	5	4	5	4	5	5	6	5	7	6	4	4	5	7	4	4	4	3	2	3	3	3	2	3	2	2	2	2	2	3	2	3					

Fonte: Autoria própria.

A consulta a 35 especialistas resultou em uma matriz com 31 variáveis explanatórias (Tabela 30), totalizando 1.085 avaliações em escala Likert de 1 a 7. O conjunto representou ampla diversidade técnica e percepção consolidada sobre os fatores que influenciam a expansão do Sistema de Esgotamento Sanitário (SES). As variáveis de 1 a 17 foram incorporadas à simulação por apresentarem médias maiores ou igual 4, enquanto as de 18 a 33 foram descartadas por média inferior a 4.

A análise descritiva indicou média geral de 4,1, mediana de 4,0 e desvio-padrão de 1,5, caracterizando dispersão moderada e homogeneidade nas respostas. As notas concentraram-se entre 3 e 6, refletindo percepção predominantemente positiva e entendimento comum entre os especialistas.

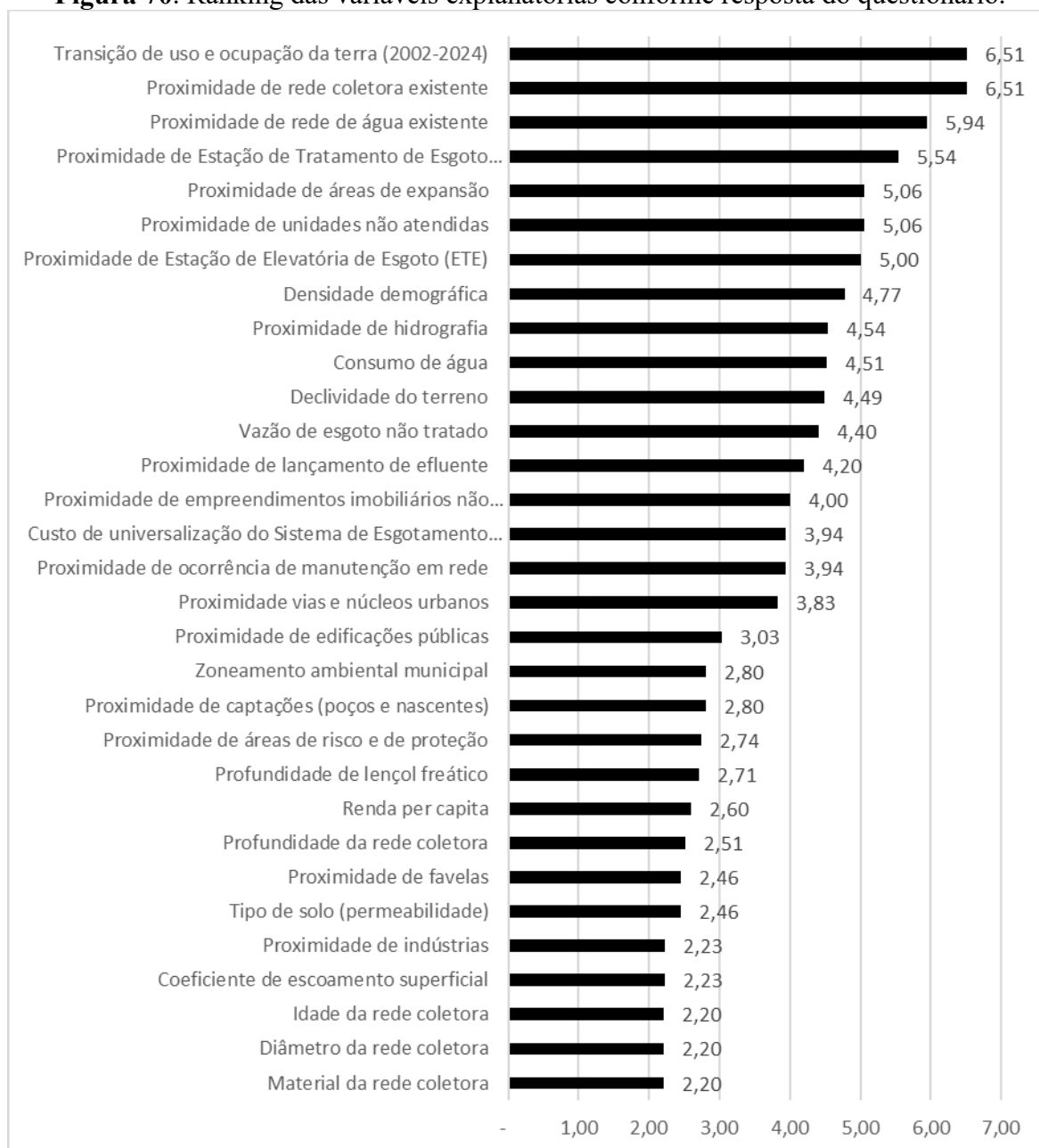
Destacaram-se como mais influentes a proximidade de rede coletora existente (v9), com média 6,7, e a transição do uso e ocupação do solo (v14), com média 6,8 — variáveis que representam, respectivamente, a presença de infraestrutura e o crescimento urbano.

Também obtiveram médias elevadas a proximidade de estações de tratamento (v7) e de rede de água (v10), ambas superiores a 6, evidenciando a relevância da conectividade com sistemas consolidados.

Por outro lado, fatores físicos e geotécnicos, como profundidade do lençol freático, tipo de solo, material, diâmetro, idade e profundidade da rede coletora, apresentaram médias menores que 3, sendo percebidos como de influência secundária. Variáveis socioambientais — renda per capita, proximidade de áreas de risco ou proteção e zoneamento ambiental municipal — obtiveram médias entre 3 e 3,5, refletindo relevância intermediária e maior subjetividade nas avaliações.

Por fim, variáveis operacionais, como ocorrência de manutenção (v4) e vazão de esgoto não tratado (v16), situaram-se próximas à média geral, evidenciando importância moderada no comportamento expansivo do SES da BHRC.

A Figura 70 apresenta a posição das variáveis explanatórias conforme o questionário respondido pelos especialistas.

Figura 70. Ranking das variáveis explanatórias conforme resposta do questionário.

Fonte: Autoria própria.

A Figura 70 indica ampla convergência entre os especialistas de que a transição do uso e ocupação do solo é o principal indicador para priorizar a expansão do SES. Essa variável sintetiza o vetor de urbanização recente e iminente e, por isso, “antecipa” onde a demanda por coleta e tratamento tende a crescer mais rapidamente. Em seguida, o conjunto de variáveis vinculadas à infraestrutura (p. ex., proximidade de rede coletora e de rede de água) e à pressão antrópica (p. ex., densidade demográfica e consumo de água) aparece com elevada importância, refletindo a leitura do campo: a expansão costuma ocorrer primeiro onde já existe base técnica instalada e concentração de usuários.

Em um estrato intermediário, a Figura 70 sugere que os especialistas valorizam variáveis que “puxam” a universalização nos curto e médio prazos — como unidades não atendidas, áreas de expansão e empreendimentos imobiliários — pois elas sinalizam bolsões de déficit e frentes de obra com alto retorno sanitário e social. Já as variáveis físico-ambientais (declividade, hidrografia, lençol freático, tipo de solo), embora reconhecidas, tendem a ser percebidas como condicionantes de traçado e custo, e não como vetores primários de decisão espacial, o que as posiciona mais abaixo no ranking.

A Figura 70 exhibe que dimensões como custo de universalização e certos atributos operacionais (idade/material/profundidade de rede) aparecem com menor peso relativo, sugerindo que, para a priorização territorial, os especialistas privilegiam primeiro onde expandir; quanto custará e como executar entram como camadas seguintes do planejamento.

Da mesma forma, verifica-se na Figura 70 que variáveis de cunho socioambiental — como renda per capita, zoneamento ambiental e proximidade de áreas de risco — mostraram importância moderada, entre 3,0 e 3,5, sugerindo que, embora reconhecidas como condicionantes, são consideradas de efeito indireto sobre a expansão física do sistema.

O ranking (Figura 70) sugere variáveis “dinâmicas” (transição do uso, pressão antrópica) ganham tração em horizontes mais longos, enquanto variáveis “de proximidade” (infraestrutura existente) performam melhor em horizontes de curto prazo. Essa leitura dialoga com os resultados dos modelos da tese (Regressão Logística melhor no curto prazo; MLP mais robusto no longo prazo).

A Tabela 31 apresenta os resultados das métricas estatísticas aplicadas ao questionário.

Tabela 31. Resultados das métricas estatísticas.

Métrica	Valor	Comentário
Alfa de Cronbach (α)	0,740	Consistência interna boa — o questionário é confiável e as respostas mostram coerência entre as variáveis.
Coefficiente de Correlação Intraclasse (ICC)	0,554	Concordância moderada entre os 35 especialistas; há variação nas percepções individuais, mas ainda dentro de um nível aceitável.
Coefficiente de Concordância de Kendall (W)	0,583	Concordância moderada a boa na ordenação de importância das variáveis, indicando tendência de consenso entre os especialistas.

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 31 aponta que o valor de $\alpha = 0,74$ indica boa consistência interna, demonstrando que o questionário foi compreendido de forma uniforme pelos respondentes.

Esse resultado confirma que as variáveis foram avaliadas de modo coerente e representam, em conjunto, aspectos correlacionados do mesmo fenômeno — a expansão SES.

Já o ICC igual a 0,55 sugere nível moderado de concordância entre os especialistas, o que é esperado em grupos multidisciplinares, compostos por profissionais com experiências distintas (projeto, operação, planejamento, geoprocessamento, obras, manutenção e regulação). Essa diversidade de percepções contribui positivamente para a robustez da análise, uma vez que reflete o ecossistema técnico-operacional real do saneamento.

Por fim, o Kendall's W correspondente a 0,58 demonstra concordância moderada a boa na ordenação de importância das variáveis, ou seja, embora existam diferenças pontuais nas notas atribuídas, há uma tendência clara de consenso sobre quais fatores mais influenciam a expansão do SES. Esse resultado reforça a validade do processo de hierarquização das variáveis preditoras utilizadas na modelagem espacial.

A Tabela 31 sinalize que, em termos práticos, o ranking apresentado na Figura 67 é estatisticamente confiável para orientar a priorização das variáveis na modelagem e no planejamento da expansão do SES, ainda que se reconheça alguma heterogeneidade de julgamento entre os respondentes. Essa heterogeneidade é esperada em grupos multidisciplinares e reforça a necessidade de parcimônia na seleção das variáveis, evitando redundâncias e colinearidades que possam comprometer a robustez dos modelos.

A elevada importância atribuída simultaneamente a rede coletora, rede de água, densidade e consumo sugere correlações entre elas. A análise da Figura 67 associada à Tabela 31 orienta, portanto, a parcimônia: testar multicolinearidade e considerar regularização ou redução de dimensionalidade para estabilizar parâmetros sem perder sinal preditivo.

Ainda analisando a Tabela 31 juntamente com Figura 69, verifica-se que o posicionamento de lançamentos/vazão não tratada reforça a utilidade das variáveis ambientais como filtros de priorização, mesmo quando não lideram o ranking: elas ajudam a ordenar frentes de obra em que a redução do Índice de Vazão de Esgoto Não Tratado (IVNT) e o aumento do Índice de Cobertura Hidrográfica (ICH) são mais imediatos.

APÊNDICE C – CONCLUSÕES

Conclui-se que o ranking das variáveis explanatórias confirma uma tendência técnica predominante: a expansão do Sistema de Esgotamento Sanitário (SES) é orientada principalmente por critérios espaciais, operacionais e infraestruturais, enquanto variáveis socioeconômicas e ambientais assumem papel complementar no processo decisório.

Os resultados estatísticos reforçam essa interpretação, indicando boa consistência interna do questionário e concordância aceitável entre os especialistas, o que valida sua utilização como instrumento para seleção e ponderação das variáveis preditoras.

Dessa forma, o ranking obtido constitui uma base confiável para subsidiar a modelagem espacial e o planejamento da universalização do SES na Bacia Hidrográfica do Rio Cotia.

Recomenda-se realizar análises de sensibilidade e aplicar técnicas para reduzir a multicolinearidade, assim como para horizontes mais longos, devem ser incorporadas variáveis que sinalizam frentes de crescimento, validando sempre com métricas de desempenho dos modelos.